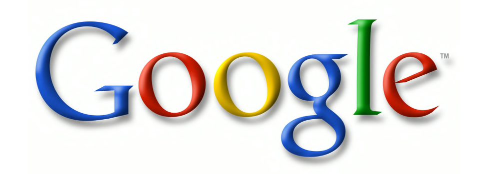
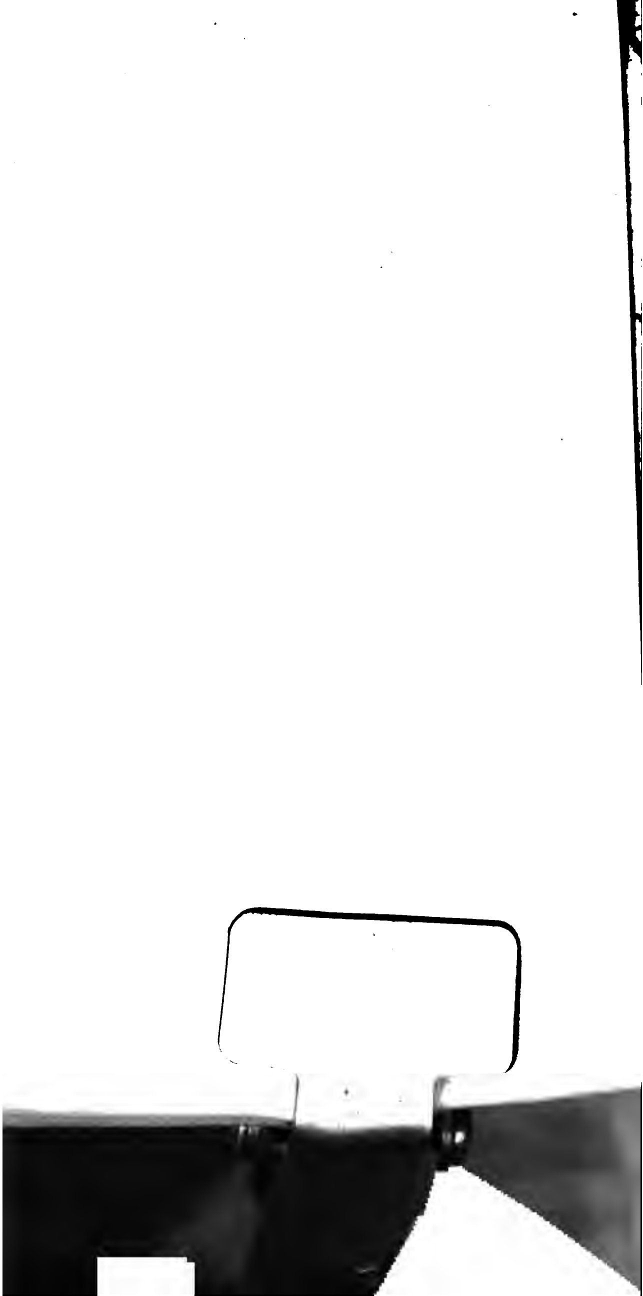




ENCYCLOPÉDIE-RORET

L'INGÉNIEUR CIVIL.

TOME PREMIER.

AVIS.

Le mérite des ouvrages de l'*Encyclopédie-Roret* leur a valu les honneurs de la traduction, de l'imitation et de la contrefaçon. Pour distinguer ce volume, il portera, à l'avenir, la signature de l'Editeur.



MANUELS-RORET.

NOUVEAU MANUEL COMPLET

DE

L'INGÉNIEUR CIVIL,

OU

TRAITÉ SUR L'APPLICATION DIRECTE DES SCIENCES AUX ARTS ET MANUFACTURES,

CONTENANT

DES NOTIONS PRATIQUES TRÈS-ÉTENDUES
SUR LES SCIENCES MATHÉMATIQUES, LA PHYSIQUE ET LA CHIMIE INDUSTRIELLES,
LES MACHINES A VAPEUR, L'ARCHITECTURE CIVILE ET INDUSTRIELLE,
LA CONSTRUCTION DES PONTS, ROUTES, CANAUX, CHEMINS DE FER, CONDUITES D'EAUX;
LES MINES ET LA MÉTALLURGIE.

Par MM.

E. SCHMITZ,

Chevalier de la Légion-d'Honneur, ancien Directeur de la Mine du Creusot, Ingénieur des exploitations métallurgiques de la Maison *Lavoissière* frères;

C. E. JULLIEN,

Ex-Ingénieur de l'Atelier de Construction du Creusot, Garde-Mines du département de la Seine;

Et E. LORENTZ, Ingénieur Civil.

TOME PREMIER.

Ouvrage orné d'un bel Atlas renfermant 28 Planches gravées sur acier.

PARIS,

A LA LIBRAIRIE ENCYCLOPÉDIQUE DE RORET,

RUE HAUTEFEUILLE, 10 BIS.

1845.

[redacted]

PRÉFACE.

L'art de l'Ingénieur Civil consiste dans l'application intelligente des principes de la science aux opérations *industrielles*.

Cette application ne peut être faite avec fruit qu'autant que celui qui en est chargé connaît parfaitement et la science et l'industrie, du moins en ce qu'ont de commun entre elles ces deux vastes branches de la civilisation.

Le but des auteurs, en publiant un Manuel de l'*Ingénieur Civil*, a été, non de traiter chaque science dans toutes ses particularités, non de décrire chaque industrie avec ses tours de main, mais uniquement de résoudre toutes les questions qui se présentent dans le contact de ces deux spécialités.

Si ce but a été atteint, ils ont rendu service, non-seulement aux ingénieurs, sous les yeux desquels ils exposent aussi clairement que possible les principes de leur profession, mais encore aux savants et aux industriels, en les mettant à même, les premiers, d'utiliser leur instruction autrement que par l'enseignement, les seconds, de faire usage des découvertes des premiers.

Cet ouvrage se compose de quatre parties, savoir:

Première partie, *Sciences industrielles.*

Deuxième partie, *Mécanique.*

Troisième partie, *Construction.*
Quatrième partie, *Métallurgie.*

La *première* partie est l'exposé des principes de la science qui ont leur application directe dans l'industrie.

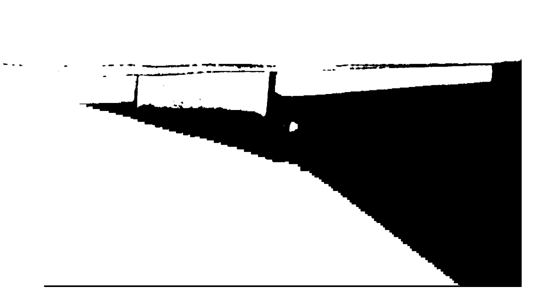
Les *trois* autres parties sont l'application de ces principes à la construction des machines, à celle des édifices, des ponts, des routes, des canaux et des conduites d'eau, ainsi qu'à l'exploitation des mines et au traitement des minerais pour les convertir en métaux.

Outre des considérations nouvelles sur les engrenages, ainsi que sur la physique et la chimie industrielles, on trouvera de grands développements sur la construction des machines en général et sur la métallurgie, notamment en ce qui concerne l'exploitation des mines.

Un livre du genre de celui-ci pouvait facilement donner matière à deux fois autant de texte qu'*il* en possède; mais le grand mérite des ouvrages composant l'*Encyclopédie-Roret* étant de contenir le plus de renseignements possible, dans un cadre assez restreint pour que le prix en soit accessible au plus grand nombre, il a fallu, de toute nécessité, n'aborder que les parties de la science industrielle les plus indispensables, et, partant, exclure toutes les dissertations, la plupart du temps oiseuses, dont abondent les trop longs ouvrages.

Il résulte de là que ce Manuel, bien qu'en deux volumes, est un véritable *Vade-Mecum* à l'usage des Ingénieurs.





NOUVEAU MANUEL COMPLET

DE

L'INGÉNIEUR CIVIL.

PREMIÈRE PARTIE.

SCIENCES INDUSTRIELLES.

Nous comprenons sous la dénomination générale de sciences industrielles, la série des connaissances théoriques nécessaires à l'étude des différentes branches de l'art de l'ingénieur, considérées seulement sous le point de vue de leur application à cet art, et non dans tous les détails qu'elles comportent, comme cela a lieu dans les livres qui sont spéciaux à chacune d'elles.

Les connaissances théoriques que nous regardons comme propres à l'art de l'ingénieur sont, abstraction faite de l'arithmétique, la géométrie et l'algèbre qui composent le cours de mathématiques élémentaires, les suivantes, savoir :

1° L'usage de la règle à calculs ;

2° La géométrie descriptive ;

3° La théorie des ombres et de la perspective ;

4° La coupe des pierres ;

5° Les engrenages ;
6° La statique ;
7° La dynamique ;
8° La physique industrielle ;
9° La chimie industrielle.

Il y aurait bien encore la géologie, mais cette partie étendue et moins indispensable, a été traitée d'une manière si complète par M. Huot, dans ses deux Manuels faisant partie de l'*Encyclopédie-Roret*, que nous croirions faire des répétitions oiseuses et nuisibles même à cette collection, si nous en parlions ici ; nous renvoyons donc le lecteur aux ouvrages de M. Huot pour la *Géologie* et la *Géographie physique*.



LIVRE PREMIER.

RÈGLE A CALCULS.

INTRODUCTION.

La règle à calculs (*Pl.* XVI, *fig.* 41, 42, 43 et 44) se compose de deux parties, savoir :

La *règle* et la *coulisse*.

La règle possède deux espèces de divisions : l'une *supérieure* A, l'autre *inférieure* B ; la coulisse en possède une seule répétée deux fois B et C.

Les divisions supérieures de la règle sont les mêmes que celles de la coulisse, et diffèrent des divisions inférieures.

La coulisse étant placée dans la règle de manière que sa première ligne à gauche coïncide avec la première ligne à gauche de la règle, toutes les divisions de la partie supérieure de la règle doivent coïncider avec celles de la coulisse, sans quoi l'appareil complet est défectueux et tout-à-fait impropre aux calculs.

THÉORIE DE LA RÈGLE A CALCULS.

La règle à calculs est une table de logarithmes dans laquelle les chiffres sont remplacés par des lignes.

Il résulte de là que toutes les opérations qui se font au moyen des logarithmes, se font aussi au moyen de la règle.

De même que, dans les tables de logarithmes, les logarithmes d'un nombre multiplié par 1, 10, 100, 1000, etc., sont les mêmes, à la caractéristique près, de même aussi, dans la règle, ces logarithmes sont représentés par les mêmes longueurs, ce qui indique qu'il y a le même travail à faire, pour trouver la position de la virgule, dans les calculs avec la règle que dans les calculs effectués au moyen des tables.

Le logarithme de 1 étant 0, il suffit de se donner une longueur quelconque pour le logarithme d'un nombre plus grand que 1, pour avoir les longueurs correspondantes aux logarithmes de tous les autres nombres, en remarquant que l'on a l'équation générale

$$10^{x} = y$$

dans laquelle :

10 est la base de notre système de numération ;

[redacted]

y est un nombre quelconque;
x est le logarithme de y.
Si nous faisons $y = n$, il vient:

$$10^{x} = n$$

Pour une autre valeur n' de y on a:

$$10^{x'} = n'$$

de la première, on tire : $10 = \sqrt[x]{n}$

de la deuxième, on tire : $10 = \sqrt[x']{n'}$

d'où : $$\sqrt[x']{n} = \sqrt[x]{n'}$$

et $$n^{x'} = n'^{x}$$

n et n' sont deux nombres quelconques; donc, pour une valeur donnée à x, il en résulte une autre pour x'.

Pour déterminer cette valeur de x' résultant de x, il n'est pas nécessaire de résoudre l'équation:

$$n^{x'} = n'^{x}$$

Cette équation a été résolue, lors de la confection des tables de logarithmes, et connaissant la longueur l correspondante à x, on obtient la longueur l' correspondante à x' en posant la proportion:

$$x : x' :: l : l' = \frac{l\,x'}{x}$$

Car les longueurs qui représentent le logarithmes doivent être entre elles comme ces logarithmes eux-mêmes.

Soit pour exemple $n = 2$

on a : $$x = 0.30103$$

et $$0.30103 : x' :: l : \frac{l\,x'}{0.30103}$$

Donc, *pour obtenir la longueur correspondante au logarithme d'un nombre quelconque, connaissant celle correspondante au logarithme d'un nombre donné, il suffit de multiplier la lon-*

gueur donnée par le logarithme du nombre quelconque, et de diviser ce produit par le logarithme du nombre donné.

Connaissant les longueurs correspondantes aux logarithmes de tous les nombres, il n'est pas nécessaire, comme pour ces derniers, de les posséder chacune séparément, pour les venir prendre l'une après l'autre et les ajouter ou les retrancher, suivant l'opération à effectuer. Remarquant que les opérations ne se font jamais que successivement et sur deux nombres à la fois, et qu'il suffit pour cela d'avoir les deux nombres sur lesquels on opère indépendants l'un de l'autre, on arrive au résultat demandé en composant deux tables parfaitement égales et dans chacune desquelles les longueurs correspondantes à tous les logarithmes partent toutes du même point : de là l'origine de la coulisse.

Connaissant l'usage des tables de logarithmes, nous voyons de suite que pour faire une multiplication, il suffit de prendre sur la règle la longueur correspondante au logarithme du multiplicande, et sur sa coulisse celle correspondante au logarithme du multiplicateur ; d'ajouter ces longueurs et de regarder au logarithme de quel nombre correspond la longueur égale à la somme des deux longueurs données.

La première observation que suscite cette explication, c'est que, à l'examen de la règle, il paraît difficile que, dans les 0.m125 qui contiennent les longueurs correspondantes aux logarithmes de tous les nombres, il y ait autant de divisions qu'il y a de logarithmes dans les tables de Callet, par exemple.

Cela, en effet, n'a pas lieu ; aussi la règle à calculs n'est-elle pas destinée à donner des résultats aussi exacts que ces tables, mais seulement des résultats d'autant plus exacts qu'elle contient plus de divisions, ou, ce qui revient au même, qu'elle est plus longue, car le nombre des divisions est proportionné à sa longueur.

Pour nous faire une idée de l'exactitude approximative que donne la règle à calculs ordinaires, nous allons rechercher sa longueur *minima* qui serait convenable pour que les calculs fussent aussi exacts qu'avec les tables de Callet.

Les tables de Callet vont de 0 à 108000, soit 100000.

Les logarithmes vont donc de 0 jusqu'à 5. Il y a 8 chiffres décimaux ; donc, pour passer d'un chiffre entier au chiffre immédiatement supérieur, il faut avoir passé par 100,000,000 de cent millionnièmes.

De 0 à 5 il y a :

0, 1, 2, 3, 4, 5.

c'est-à-dire 5 fois 100,000,000 de cent millionnièmes, ou 500,000,000 de divisions, si on veut être sûr de trouver les logarithmes de tous les nombres compris entre 1 et 100,000 à $\frac{1}{100,000,000}$ près.

L'épaisseur la plus petite que l'on puisse donner à une division est 1/4 de millimètre, d'où 500,000,000 de divisions $= 500,000,000 \times 0.^{m}00025 = 125000$ mètres $= 31^{\text{lieues}}25$.

La règle à calculs ordinaire a $0.^{m}26$ de long. Sur cette longueur, $0.^{m}25$ seulement portent des divisions dont une moitié est la répétition de l'autre moitié. Les 31 lieues 1/4 que nous venons de trouver sont donc représentées par une longueur de $0.^{m}125$.

Il résulte de là que la règle à calculs n'est point un instrument propre à donner des résultats exacts, mais seulement des résultats approximatifs tels que ceux dont on a le plus souvent besoin dans les arts, où elle rend les plus grands services.

DIVISION DE LA RÈGLE.

Nous avons dit que, connaissant la longueur correspondante au logarithme d'un nombre, on obtenait celle correspondante à un autre nombre en posant :

$$l' = \frac{l\,x'}{x}$$

Soit 10 le nombre, on a, d'après ce que nous avons dit plus haut :

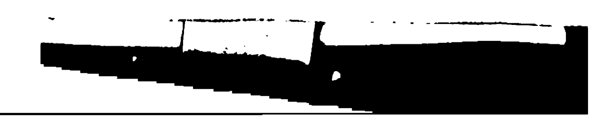
$$l = 0^{m}.125$$

Le logarithme de 10 est 1, donc $x = 1$;

d'où : $$l' = 0.125\,x'$$

Prenant les logarithmes des nombres compris entre 1 et 10 suivis d'autant de décimales que l'on voudra, on obtient les valeurs de l' correspondantes à tous ces nombres. Alors, au lieu d'avoir un nombre considérable de divisions égales, comme dans la méthode que nous avons exposée précédemment, on a autant de divisions que l'on a considéré de nombres.

Comme, en ajoutant deux logarithmes, ce n'est pas la somme de ces deux logarithmes que l'on tient à connaître, mais le nombre auquel cette somme correspond, au lieu de donner aux longueurs les noms des logarithmes qu'elles représentent, on les désigne par les noms des nombres que ces



logarithmes représentent eux-mêmes. Ainsi, on voit sur la règle (*Pl.* XVI, *fig.* 41, 42 et 44) les chiffres

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 1

qui veulent dire :

Longueur correspondante au logarithme de 1
Idem. . . . . de 2
Idem. . . . . de 3
Idem. . . . . de 4 etc., etc.

toujours à partir de la première ligne à gauche.

La caractéristique étant supprimée, les logarithmes de 1, 2, 3, etc., sont aussi ceux de 10, 20, 30, 40, 50, etc.; alors les logarithmes des nombres compris entre 10 et 20, 20 et 30, 30 et 40, etc., sont indiqués par les grandes divisions qui existent entre 1 et 2, 2 et 3, 3 et 4, etc. ; ceux de 15, 25, 35, etc., sont plus grands que les autres afin que la lecture soit plus facile.

Par la même raison, les logarithmes des nombres 10, 11, 12, etc., 21, 22, 23, etc., 91, 92, 93, etc., sont les mêmes que ceux des nombres 100, 110, 120, etc., 900, 910, 920, etc. Alors les logarithmes des nombres compris entre 100 et 110, 110 et 120, etc., sont indiqués par les petites divisions comprises entre celles indiquant les seconds chiffres.

Entre 1 et 2 chacune des subdivisions est divisée en cinq parties; or, comme entre 100 et 110, 110 et 120, etc., il y a neuf unités, il en résulte que chaque petite division représente deux unités; ainsi, on a entre 120 et 130 :

120, 122, 124, 126, 128, 130.

D'où suit que les nombres impairs 121, 123, 125, 127, 129, tombent au milieu de ces petites divisions, un peu à droite, comme l'indiquent les différences décroissantes, entre les nombres successifs, au fur et à mesure que l'on avance vers la droite.

Entre 2 et 5 chacune des subdivisions est divisée en deux parties. Chaque partie contient donc 5 nombres. Ainsi, entre 200 et 210, on lit seulement 205, les autres nombres devant être déterminés approximativement.

Entre 5 et 10, aucune des subdivisions n'est divisée; elles comptent donc alors chacune pour 10 dans les centaines. Ainsi, entre 500 et 510, on a 501, 502, 503, 504, etc., qu'il faut lire approximativement, ce à quoi on arrive assez exactement avec l'habitude.

Il est donc possible, avec la règle, d'obtenir deux chiffres parfaitement exacts, et le troisième

exact entre 1 et 2,
assez exact entre 2 et 5,
douteux entre 5 et 10,

Il résulte de là que le quatrième chiffre s'obtient presque entre 1 et 2.

Ainsi, en résumé :

Les chiffres 1, 2, 3, 4, etc., affectés aux grandes divisions, indiquent le premier chiffre à gauche du nombre considéré.

Les subdivisions intermédiaires indiquent le deuxième chiffre.

Les petites divisions indiquent le troisième chiffre.

Exemple.

Trouver 457.
Nous prenons 4, grandes divisions,
5, subdivisions entre 4 et 5,
1, 4 petites divisions entre la 5e et la 6e subdivision.

Trouver 1257.
Nous prenons 1, grandes divisions;
2, subdivisions ;
2, 5 petites divisions entre la 2e et la 3e subdivision.

Pour le 7 on se dit : 57 est près de 60, c'est donc un peu plus que 1/2 division.

OPÉRATIONS D'ARITHMÉTIQUE.

1° MULTIPLICATION.

Soit proposé de multiplier 529 par 438.

Nous posons le 1 de la coulisse sous 529 pris sur la règle, et nous regardons au-dessus de 438, pris sur la coulisse, ce qui nous donne sur la règle 232. Le produit véritable est 231702. Le nombre 232000 approche donc assez de 231702, si, au lieu du produit de 438 par 529, on veut celui de 4,38 par 5,29; car on a alors 23,2 au lieu de 23,17.

Pour avoir le nombre de chiffres en tiers du produit, on procède ainsi :

438 est compris entre 400 et 500,
529 est compris entre 500 et 600,
438×529 est donc plus grand que $400 \times 500 = 200000$.
C'est alors 232000.

Principe.

Pour faire la multiplication, on place le 1 de la coulisse au-dessous du multiplicande, pris sur la règle, et on a le produit, sur la règle, au-dessus du multiplicateur pris sur la coulisse.

2° DIVISION.

Soit proposé de diviser 2317 par 438.

L'opération est l'inverse de la précédente : nous plaçons 438, pris sur la coulisse, au-dessous de 2317 pris sur la règle, et nous obtenons 529 sur la règle, au-dessus de 1, pris sur la coulisse.

Mais il n'est pas facile de placer 438 au-dessous de 2317, et il est une méthode qui n'a pas l'avantage, il est vrai, d'être exactement l'inverse de l'opération précédente, mais qui rend le travail infiniment plus facile.

Pour cela, remarquons que

$$\frac{2317}{438} = \frac{1}{438} \times 2317$$

alors l'opération devient la suivante :

Mettre 438 au-dessous de 1, ce qui est facile, et donne sur la règle le quotient, dont nous nous inquiétons peu, de 1 par 438, puis regarder au-dessus de 2317, pris sur la coulisse, indiquant que ce quotient doit être multiplié par 2317.

Ainsi, on obtient d'abord $\frac{1}{438} = 228$, qui, multiplié par 2317, donne 529; telle est la méthode la plus convenable pour exécuter la division.

Principe.

Pour faire la division, on place le diviseur, pris sur la coulisse, au-dessous de 1, pris sur la règle, puis on regarde au-dessus du dividende, pris sur la coulisse, et on obtient le quotient sur la règle.

3° PROPORTIONS.

Soit proposé de résoudre

$$15 : 23 :: 19 : x$$

on a :

$$\frac{15}{23} = \frac{19}{x}$$

Le quotient de 15 par 23 est le même que celui de 19 par x.

Si donc nous plaçons 23 au-dessous de 15, nous obtenons x au-dessous de 19, et nous avons $x = 29.2$.

De là, si on a

$$15 : 23 :: 19 : x :: 47 : y :: 72 : z :: \text{etc.},$$

on obtient x, y, z, etc., en posant simplement 23 au-dessous de 15, et en regardant successivement au-dessous de 19, 47, 72, etc.

Principe.

Pour trouver tant de nombres que l'on voudra, qui soient à tant de nombres donnés dans le rapport de n *à* m, *il suffit de placer* n, *pris sur la coulisse, au-dessous de* m, *pris sur la règle, puis regarder, sur la coulisse, les nombres au-dessous des nombres donnés, pris sur la règle.*

4° QUARRÉS ET RACINES QUARRÉES.

Le quarré d'un nombre est le produit de ce nombre par lui-même; le logarithme d'un quarré est le double du logarithme de la racine.

De là, si nous divisons la partie inférieure de la règle suivant les principes qui ont servi de base à la division supérieure, mais de manière que chaque division inférieure soit le double de la division supérieure correspondante, il en résulte que chacun des nombres de la division inférieure est la racine quarrée du nombre immédiatement supérieur, et réciproquement.

Ainsi, pour avoir le quarré de 2, on place le 1 de la coulisse sous le 2 de la règle, et on regarde au-dessus du 2 de la coulisse, ce qui donne 4. Le 2 de la partie inférieure, ayant une longueur double de celle du 2 de la partie supérieure, se trouve par conséquent au-dessous du 2 de la coulisse, après l'opération que nous venons d'indiquer, c'est-à-dire au-dessous du 4.

Premier principe.

Pour avoir le quarré d'un nombre, on prend ce nombre sur la ligne inférieure de la règle, puis on regarde au-dessus, soit sur la coulisse coïncidant avec la règle fermée (fig. 42), *soit sur la règle, en plaçant le* 1 *de la coulisse au-dessus du nombre pris sur la ligne inférieure.*

Le quarré de 3 étant 9, et le quarré de 4 étant 16, nous disons :



La longueur entre le 3 inférieur et le 27 supérieur étant égale à la longueur du 3 de la coulisse, retournons cette dernière de manière que, ses chiffres ayant la tête en bas, le 1 tombe au-dessous du 27 supérieur ; alors le 3 de le coulisse tombera exactement au-dessus du 3 de la partie inférieure.

D'où :

Deuxième principe.

Pour obtenir la racine cubique d'un nombre, on renverse la coulisse et place son 1 au-dessous du nombre considéré, puis on cherche à la partie inférieure le nombre qui se trouve immédiatement au-dessous de lui-même, pris sur la coulisse.

Remarque. Pour extraire la racine cubique d'un nombre, on le divise en tranches de trois chiffres, en partant de la droite, et le premier chiffre à gauche de la racine est le même que la racine cubique de la première tranche à gauche. Or, cette tranche peut se composer de 1, 2 ou 3 chiffres, et sa racine varie suivant le nombre de ces chiffres. Il résulte de là, que, en extrayant la racine cubique par la méthode que nous venons d'indiquer, on trouve trois nombres qui satisfont à la condition que nous avons énoncée en principe pour l'extraction de la racine cubique. Il y a donc doute sur celui de ces trois nombres que l'on doit prendre.

Pour éviter cette hésitation, il suffit de séparer en tranches de trois chiffres, en partant de la droite, le nombre dont on veut extraire la racine cubique ; alors, connaissant les racines des 10 cubes parfaits, compris entre 1 et 1000, on détermine immédiatement entre quels deux chiffres de la ligne inférieure on devra chercher la racine cubique.

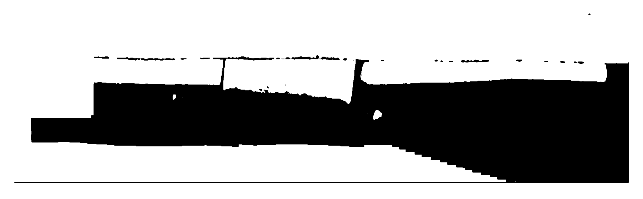
Exemple.

Soit proposé d'extraire la racine cubique de 54924873 ; ce nombre devient 54,924,873.

Le plus grand cube contenu dans 54 est 27, dont la racine est 3 : donc c'est entre 3 et 4 qu'il faut chercher la racine de ce nombre : on trouve 380.

6° LOGARITHMES.

Derrière la coulisse (*fig.* 43) est une partie plate que l'on a voulu utiliser, et on y est arrivé d'une manière très-satisfaisante. Les trois lignes en tête desquelles on voit à droite S, T, L, sont destinées à donner les valeurs des *sinus*, *tangentes* et *logarithmes*. Voici comment on procède pour ces derniers :



La ligne inférieure de la règle étant considérée comme l: série des longueurs proportionnelles aux logarithmes des nom bres que l'on peut y lire, une longueur égale prise derrière l: coulisse est divisée en parties égales entre elles et cotées d manière qu'en mesurant, au moyen de cette espèce d'échelle les différentes longueurs correspondantes aux différents nombres, on obtient les rapports entre les logarithmes de ces lon gueurs; c'est-à-dire ces logarithmes eux-mêmes, si on a soi de diviser la longueur comprise entre 1 et 10 en 10, 100 1000, etc. parties égales.

Ici elle se trouve divisée en 10 grandes parties qui sont elles-mêmes divisées en 10 autres, subdivisées en 5, dont chacun compte pour deux; il en résulte que l'on peut obtenir trois chif fres d'un logarithme et quelquefois quatre.

Si, retournant la coulisse, nous la plaçons sur la règle d manière que le 0 des logarithmes corresponde au 10 de l partie inférieure de la règle, et le 100 des logarithmes au 1 d cette partie; nous voyons en faisant marcher graduelleme la coulisse vers la gauche, que :

Le logarithme de 10 est 100, c'est-à-dire 1,00

Celui de 8	. 90,4	. . .	0,904
Celui de 80	. . .	. . .	1,904
Celui de 45	. 65,4	. . .	1,654
Celui de 4,5	. . .	. . .	0,654

c'est-à-dire une longueur décroissante à la partie décimale mesure que le nombre décroît, abstraction faite de la *car téristique* qui est déterminée par le nombre des chiffres e tiers.

Il n'est pas nécessaire, pour obtenir les logarithmes nombres, de placer la coulisse retournée sur la règle, il su de faire ainsi :

Principe.

Pour trouver le logarithme d'un nombre, on place le premi à gauche de la coulisse, au-dessus du nombre dont on veut le garithme, pris sur la ligne inférieure, puis on retourne la r et regarde à l'endroit des logarithmes la longueur corresp dante.

7° SINUS ET TANGENTES.

Le sinus de 0° est 0, celui de 90° est égal au rayon.

La tangente de 0° est 0, celle de 45° est égale au rayo

Soit la longueur totale de la coulisse = Rayon = 10; on a alors :

Longueur correspondante au sinus de 90° = 10;

Longueur correspondante à la tangente de 90° = 10;
ce qui est indiqué derrière la coulisse, immédiatement en regard du 10 de la coulisse, et ce qu'on lit facilement en mettant le 10 de la coulisse au-dessous du 10 de la règle, à droite, et regardant derrière à la ligne de l'échancrure de la règle qui est précisément la même que celle du 10.

Supposant maintenant les sinus et les tangentes des différents degrés du quadran indiqués derrière la coulisse en regard des longueurs correspondantes proportionnelles à la longueur du rayon, on trouve ainsi, le rayon étant 10 :

Sinus	30°	=	5,00
Tangente	35°	=	7,00
Sinus	12°	=	2,07
Tangente	5°	=	0,879
Sinus	2°	=	0,350

et ainsi de suite.

Principe.

Pour trouver la valeur du sinus ou de la tangente d'un angle en fonction du rayon, on retourne la règle et place la division qui représente l'angle considéré en coïncidence avec l'échancrure, puis on retourne et regarde sur la coulisse au-dessous de 10 à droite de la série supérieure.

8° RÉDUCTEURS.

On donne ce nom à la série de nombres qui garnissent le dos de la règle (*fig.* 43) et sont destinés à abréger considérablement tous les calculs qui se font au moyen de formules dans lesquelles entrent divers nombres qui sont toujours les mêmes.

Les réducteurs figurés sur la règle de *Collardeau*, servent à trois genres de calculs différents, savoir :

1° Les volumes;
2° Les poids;
3° Les surfaces, etc.

1° *Calculs des volumes.*

Tous les volumes s'expriment en mètres cubes.

On distingue trois solides principaux auxquels on ramène le plus généralement les cubages des volumes en général, ce sont :

1° Le prisme;

2° Le cylindre ;
3° La sphère.

Le volume du prisme est le produit de ses trois dimensions.

Le volume du cylindre est la surface de la base multipliée par la hauteur, et quand cette base est un cercle, on a :

$$V = 0.785\ D^2\ h$$

Le volume de la sphère est égal à

$$\tfrac{1}{6}\ 3.1416\ D^3 = 0.5236\ D^3$$

Toutes les fois que l'on a à cuber un cylindre, il faut mettre le 1 de la coulisse au-dessus du diamètre pris sur la ligne inférieure, puis multiplier successivement par 0,785 et par h, ce qui fait trois opérations ; de même pour une sphère.

Il est un moyen de convertir ces trois opérations en deux ; pour cela il suffit de mettre les formules sous les formes suivantes :

$$0.785\ D^2\ h = \frac{D^2\ h}{\frac{1}{0.785}} = \frac{D^2\ h}{1273}$$

$$0.5236\ D^3 = \frac{D^3}{\frac{1}{0.5236}} = \frac{D^3}{191}$$

abstraction faite de la virgule, comme complètement inutile.

Par ce moyen, pour avoir le volume du cylindre, il suffit de mettre 1273 de la coulisse au-dessus de D pris sur la ligne inférieure, puis de regarder au-dessus de h pris sur la coulisse. Car en plaçant 1273 au-dessus de D pris en bas, on divise le quarré de D pris au-dessus par 1273 ; reste donc à multiplier par h, ce que l'on fait en regardant au-dessus de h pris sur la coulisse.

Pour la sphère, on place 191 au-dessus de D pris en bas ; il reste à multiplier par D, ce que l'on fait en regardant au-dessus de D pris sur la coulisse.

La première ligne indique donc les réducteurs pour les cubages métriques, savoir :

	Prisme.	Cylindre.	Sphère.
Litre.	1	1273	191

Cela compris, le reste va tout seul.

Pour convertir les anciens volumes en nouveaux, on a :

1° Toise = 1.m95
Toise cube = 7.m.c.400

Tout volume donné en toises cubes devra être multiplié par 74 pour être exprimé en mètres cubes.

Si au contraire le volume est donné en mètres cubes, il devra être divisé par 74 pour exprimer des toisés cubes, donc :

Prisme = 74.

Voulons-nous avoir en toises cubes un cylindre dont les dimensions sont données en mètres, nous avons :

$$V = 0.785\ D^2 h \text{ en mètres cubes},$$

$$\text{et } V' = \frac{0.785\ D^2 h}{74} = \frac{D^2 h}{943} \text{ en toises cubes;}$$

on a donc : *Cylindre* = 943.

Si on voulait un réducteur pour exprimer en mètres cubes un cylindre dont les dimensions sont données en toises, on aurait :

$$V = 0.785\ D^2 h \text{ en toises cubes;}$$

$$V' = 0.785 \times 7.4\ D^2 h = \frac{D^2 h}{\frac{1}{0.785 \times 74}} = \frac{D^2 h}{172} \text{ en mètres cubes.}$$

La règle ne porte pas ce réducteur qui nous paraît plus utile que le précédent, mais dont, du reste, on peut se passer en cubant le cylindre par la méthode ordinaire $\frac{D^2 h}{1273}$ (D et h exprimés en toises) et multipliant le résultat par 74.

De même pour la sphère ; nous avons :

$$V = 0.5236\ D^3 \text{ en mètres cubes;}$$

$$V' = \frac{0.5236\ D^3}{74} = \frac{D^3}{\frac{74}{0.5236}} = \frac{D^3}{1414} \text{ en toises cubes;}$$

donc : *Sphère* = 1414.

2° PIED = 0.m325

Pied cube = 0.m.c.0343.

Tout volume donné en pieds cubes devra être multiplié par 0,0343 pour exprimer des mètres cubes ; si au contraire le volume est donné en mètres cubes, il devra être divisé par 0,0343 pour exprimer des pieds cubes ; donc :

Prisme = 343.

Voulons-nous avoir en pieds cubes un cylindre dont les dimensions sont données en mètres, nous avons :

$$V = 0.785\ D^2 h \text{ en mètres cubes ;}$$

$$V' = \frac{0.785\ D^2 h}{343} = \frac{D^2 h}{436} \text{ en pieds cubes,}$$

on a donc : *Cylindre* = 436.

Si on veut un réducteur pour exprimer en mètres cubes un cylindre dont les dimensions sont données en pieds, on a :

$$V = 0.785\ D^2 h \text{ en pieds cubes;}$$

$$V' = 0.785\ D^2 h \times 343 = \frac{D^2 h}{\frac{1}{0.785 \times 343}} = \frac{D^2 h}{372} \text{ en}$$

mètres cubes.

De même pour la sphère, nous avons :

$$V = 0.5236\ D^3 \text{ en mètres cubes;}$$

$$V' = \frac{0.5236\ D^3}{343} = \frac{D^3}{\frac{343}{0.5236}} = \frac{D^3}{655} \text{ en pieds cubes;}$$

donc : *Sphère* = 655

et pour pieds cubes en mètres cubes :

$$V = 0.5236\ D^3 \text{ en pieds cubes ;}$$

$$V' = 0.5236 \times 343 \times D^3 = \frac{D^3}{\frac{1}{0.5236 \times 343}} = \frac{D^3}{558}$$

en mètres cubes.

On obtient de même pour convertir en pouces cubes, veltes et pintes un prisme, un cylindre ou une sphère dont les dimensions sont données en mètres :

		Réducteur.
POUCE CUBE = 0.m.c.00001984	prisme. . . .	1984
	cylindre. . .	2525
	sphère. . . .	379
VELTE = 0.m.c.00745.	prisme. . . .	745
	cylindre. . .	949
	sphère. . . .	1423

PINTE = 0.m.c.000931 . . . . . { prisme. . . . 931 ; cylindre.. . . 1186 ; sphère. . . . 178 }

2° Calculs des poids.

Les réducteurs pour ces calculs s'obtiennent de la manière suivante :

Soit proposé de déterminer le poids d'un cylindre ayant pour diamètre D,
hauteur h,
densité δ.

on a :
$$\text{Poids} = 0.785\ D^2 h \times \delta$$
$$= \frac{D^2 h}{\frac{1}{0.785\ \delta}} = \frac{D^2 h}{\frac{1273}{\delta}}$$

Le réducteur est donc 1273 divisé par la densité du corps que l'on considère ; or 1273 est le réducteur pour le volume cylindrique en mètres cubes. On a de même pour le prisme $\frac{1}{\delta}$, et pour la sphère $\frac{191}{\delta}$, ce qui donne pour les différents corps :

	DENSITÉ	RÉDUCTEURS.		
Eau.	1000.	prisme.	cylindre.	sphère.
Platine.. . . .	20980	49	63	94
Or.	19268	52	66	99
Ivoire.	1925			
Mercure. . . .	13590	735	936	1405
Plomb.. . . .	11352	88	112	168
Argent. . . .	10474	95	122	182
Cuivre.. . . .	8895	114	145	217
Laiton.. . . .	8400	119	152	227
Fer..	7800	128	163	245
Fonte.	7600	131	167	25
Etain.	7291	137	175	262
Zinc.	6861	146	186	278
Antimoine.. . .	6702	149	19	285

Eau . .

Verre.
Grès.
Porcel i
Pierre
Briqu .
Chêne
Ebène
Acajo
Hêtre
Orme
Sapin
Huile

La ré
ments ,

La t
Le p
Le p
La l
La t
Le p
Le p
La li
La c
Le c
L'on
Le g
Le g
La l

M

On
alors
chiffr

(1) L
tions.

LIVRE II.

GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE.

DÉFINITIONS.

La géométrie descriptive a pour but la représentation graphique des corps situés dans l'espace. Cette représentation s'effectue au moyen des *projections*.

On nomme projection d'un point sur un plan le pied de la perpendiculaire abaissée de ce point sur ce plan. On nomme projection d'une droite sur un plan la droite d'intersection, avec ce plan, d'un autre plan conduit suivant cette droite perpendiculairement au premier.

En général on nomme projection d'un corps sur un plan, le lieu géométrique des pieds des perpendiculaires abaissées de tous les points des arêtes ou du contour de ce corps sur ce plan.

En géométrie descriptive, tout plan sur lequel on projette, porte le nom de *plan de projection*.

On distingue deux plans de projection, le *plan horizontal* et le *plan vertical*.

Toute projection située sur le plan horizontal se nomme *projection horizontale*; et toute projection située sur le plan vertical se nomme *projection verticale*.

Lorsqu'un objet, ligne, surface ou solide rencontre l'un des plans de projection, le lieu géométrique des points de rencontre porte le nom de *trace*. Il y a *trace horizontale* et *trace verticale*.

Un point n'a pas de trace; lorsqu'il est situé dans l'un des plans de projection, il est lui-même sa projection dans ce plan.

La trace d'une droite est un point.

La trace d'un plan est une ligne droite.

En général la trace d'un corps est la figure plane représentée par l'intersection de ce corps par un plan.

Les surfaces illimitées n'ont pas de projection, mais elles ont des traces. Les plans sont donc représentés par leurs traces.

La ligne de rencontre des plans de projection entre eux, c'est-à-dire la trace de chacun d'eux sur l'autre, se nomme *ligne de terre*.

PROPRIÉTÉS DES PROJECTIONS ET DES TRACES.

1° *Les projections d'un même point sont situées sur une même perpendiculaire à la ligne de terre.*

En effet, soient m^v, m^h (*Pl.* I, *fig.* 1) les projections verticale et horizontale d'un point m situé dans l'espace ; L T la ligne de terre.

La droite $m\,m^v$, située dans l'espace, étant perpendiculaire au plan vertical, tout plan conduit suivant cette droite sera perpendiculaire au plan vertical de projection (*Géométrie élémentaire de* LEGENDRE, livre V).

La droite $m\,m^h$, située aussi dans l'espace, étant perpendiculaire au plan horizontal, tout plan conduit suivant cette droite sera perpendiculaire au plan horizontal de projection.

Tout plan conduit suivant $m\,m^v$ et $m\,m^h$, qui se coupent au point m, sera à la fois perpendiculaire au plan vertical et au plan horizontal de projection ; donc il sera perpendiculaire à leur intersection (*Géométrie élémentaire*, livre V), c'est-à-dire à la ligne de terre, et les intersections avec chacun des deux plans de projection seront perpendiculaires à cette ligne en un même point. Or, le point m^v étant situé sur $m\,m^v$, est situé dans ce plan ; il est aussi situé sur le plan vertical de projection, donc il est situé (*G. E.*, liv. V) à leur intersection. Par des raisons analogues le point m^h est situé à l'intersection de ce plan avec le plan horizontal.

Les deux points m^v, m^h étant situés sur deux perpendiculaires élevées d'un même point, de part et d'autre de la ligne de terre, si de chacun de ces points on abaisse une perpendiculaire sur la ligne de terre, ces deux perpendiculaires se rencontrent en un même point sur cette ligne.

2° *Alphabet du point.*

On donne ce nom aux différentes positions que peut occuper un point par rapport aux plans de projection.

Les plans de projection étant deux plans perpendiculaires entre eux, si on coupe leur intersection, c'est-à-dire la ligne de terre, par un troisième plan perpendiculaire à cette ligne, ce troisième plan sera perpendiculaire aux deux premiers (*G. E.*, liv. V), et mesurera leur angle, d'où résulte que comme cet angle est droit, ses intersections avec les deux plans de projection seront deux droites perpendiculaires entre elles.

Soient m, m', m'', m''' (*fig.* 8), quatre points situés dans l'espace.

On obtient les projections de ces points en abaissant des perpendiculaires de chacun d'eux sur les plans de projection, et on a :

		Projections horizontale.	*Projections* verticale.
Pour le point	m	m^h	m^v
—	m'	m'^h	m'^v
—	m''	m''^h	m''^v
—	m'''	m'''^h	m'''^v

Admettant que A O et O C sont les intersections des deux faces des plans de projection les plus usités, on appelle

A O C	angle *antérieur supérieur;*
C O B	angle *postérieur supérieur;*
A O D	angle *antérieur inférieur;*
B O D	angle *postérieur inférieur.*

Supposant maintenant que le plan horizontal A B fait un quart de tour autour de la ligne de terre, les points m^h, m'^h, m''^h, m'''^h font un quart de tour autour du point o, ce qui donne en projection ordinaire la fig. 9 dans laquelle on voit que :

Tout point situé dans l'angle ANTÉRIEUR SUPÉRIEUR *a sa projection verticale au-dessus, et sa projection horizontale au-dessous de la ligne de terre,* m^v, m^h.

Tout point situé dans l'angle POSTÉRIEUR SUPÉRIEUR *a ses deux projections situées au-dessus de la ligne de terre,* m'^v, m'^h.

Tout point situé dans l'angle ANTÉRIEUR INFÉRIEUR *a ses deux projections situées au-dessous de la ligne de terre,* m'''^v, m'''^h.

Tout point situé dans l'angle POSTÉRIEUR INFÉRIEUR *a sa projection horizontale au-dessus et sa projection verticale au-dessous de la ligne de terre,* m''^v, m''^h.

Ce que nous disons ici pour le point s'applique également à la ligne droite et au plan.

3° *Les projections de deux droites parallèles sont parallèles entre elles.*

Soient deux droites D et D' parallèles entre elles. Pour avoir leurs projections sur un plan, nous menons, suivant chacune de ces droites, un plan auxiliaire perpendiculaire au plan donné. Ces deux plans sont parallèles, car étant tous deux perpendiculaires à un même plan s'ils se rencontraient, leur intersection serait perpendiculaire à ce plan (*G. E.*, liv. V).



D'un autre côté, l'intersection de deux plans conduits suivant deux parallèles est parallèle à ces droites (*G. E.*, liv. V).

De là, pour que les deux plans se rencontrent, il faut que les deux parallèles soient perpendiculaires au plan donné. Or, elles sont quelconques, donc les deux plans sont parallèles. Les intersections de deux plans parallèles par un troisième sont parallèles entre elles. (*G. E.*, liv. V), donc les projections des droites D et D', qui sont ces intersections, sont parallèles entre elles. *Par la même raison, les traces de deux plans parallèles sont parallèles entre elles.*

4° *Lorsqu'une droite est perpendiculaire à un plan, ses projections sont perpendiculaires aux traces du plan.*

En effet, lorsqu'une droite D est perpendiculaire à un plan V H (*fig.* 13), tout plan conduit suivant cette droite est perpendiculaire à ce plan (*G. E.*, liv. V). Les plans projetants de la droite sont donc perpendiculaires au plan V H. Mais ils sont aussi perpendiculaires chacun à un des plans de projection. Etant perpendiculaires à la fois au plan V H et au plan de projection, ils sont perpendiculaires à leur intersection (*G. E.*, liv. V), c'est-à-dire à la trace V ou H du plan V H sur le plan de projection correspondant, et les intersections du plan projetant avec les deux plans qui se coupent sont perpendiculaires à leur intersection, c'est-à-dire à cette trace. Or, l'intersection du plan projetant avec le plan de projection est la projection de la droite D, donc la projection de la droite D, perpendiculaire au plan V H, est perpendiculaire à la trace du plan V H, soit dans le plan vertical, soit dans le plan horizontal de projection.

5° *Les traces d'un plan se rencontrent en un même point sur la ligne de terre.*

En effet, soient V, H (*fig.* 2) les traces d'un plan situé dans l'espace, c'est-à-dire les droites de rencontre de ce plan avec chacun des plans de projection.

La droite V, étant située dans le plan vertical, ne peut rencontrer le plan horizontal qu'en un point de LT (*G. E.*, liv. V), intersection de ces deux plans, mais elle est aussi située dans le plan VH, elle ne peut donc rencontrer le plan horizontal qu'en un point de l'intersection H du plan VH avec le plan horizontal. Ne pouvant rencontrer le plan horizontal qu'en un point de LT et un point de H, elle le rencontre à leur intersection *a*.

6° *Tout plan, perpendiculaire à l'un des plans de projection,*

a sa trace, dans l'autre plan, perpendiculaire à la ligne de terre.

Soit V (*fig.* 3) la trace verticale d'un plan perpendiculaire au plan vertical de projection. Le plan horizontal de projection étant aussi perpendiculaire au plan vertical de projection, son intersection H avec le plan VH sera perpendiculaire au plan vertical de projection (*G. E.*, liv. V). Elle est donc perpendiculaire à toute droite passant par son pied dans le plan (*G. E.*, liv. V), et par conséquent à LT qu'elle rencontre au point *a* dans ce plan.

GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE PROPREMENT DITE.

La représentation graphique des objets situés dans l'espace n'est autre que la détermination des projections des points de rencontre de *lignes*, *surfaces* et *solides* entre eux. Or, cette détermination donne lieu à trois séries de problèmes, dont les solutions diffèrent, et peuvent, par cette raison, se classer ainsi qu'il suit :

Première série.

Problèmes sur la ligne droite et le plan.

Deuxième série.

Problèmes sur les plans tangents.

Troisième série.

Problèmes sur les intersections de surfaces.

PREMIÈRE SÉRIE.

PROBLÈMES SUR LA LIGNE DROITE ET LE PLAN.

Premier problème.

Etant données les projections d'une droite, trouver ses traces.

Soient D^v, D^h (*fig.* 4) les projections d'une droite D située dans l'espace.

La droite D est tout entière située dans le plan qui la projette sur le plan horizontal de projection, elle ne peut donc rencontrer ce plan qu'en un point de son intersection avec le plan projetant qui la contient (*G. E.*, liv. V), c'est-à-dire, en un point de D^h.

La droite D est tout entière située aussi dans le plan qui la projette sur le plan vertical de projection, elle ne peut donc rencontrer le plan horizontal qu'en un point de l'intersection de ce plan, avec le plan projetant qui la contient, c'est-à-dire,



en un point de la perpendiculaire $a^v a$ à la ligne de terre, trace horizontale de ce plan.

Ne pouvant rencontrer le plan horizontal qu'en un point de D^h et un point de $a^v a$, elle le rencontre à l'intersection de ces deux lignes en a.

On démontre de même que la droite D rencontre le plan vertical de projection au point b d'intersection de la projection verticale D^v de D avec la perpendiculaire élevée au point b^h, sur la ligne de terre.

Donc, pour trouver les traces d'une droite, il faut déterminer les points de rencontre a^v, b^h de chaque projection avec la ligne de terre, et élever par chacun de ces points une perpendiculaire à la ligne de terre que l'on prolonge jusqu'à la rencontre de l'autre projection. Les points ainsi déterminés sont les traces demandées.

Les *figures* 4, 5, 6 et 7 offrent des exemples de cette opération pour les cas où la droite se trouve :

1° dans l'angle antérieur supérieur;
2° dans l'angle postérieur supérieur;
3° dans l'angle antérieur inférieur;
4° dans l'angle postérieur inférieur.

Réciproque :

Etant données les traces d'une droite, trouver ses projections.

Les projections d'une droite sont des droites. Pour déterminer la position d'une droite, il suffit d'avoir deux de ses points (*G. E.*, liv. I). Or, chacune des traces de la droite dont nous cherchons les projections représente deux points : l'un sur le plan où elle est située, l'autre, sur la ligne de terre, qui est sa projection dans l'autre plan.

Il suffit donc, pour obtenir les projections d'une droite dont on connaît les traces, de *joindre la trace horizontale à la projection horizontale de la trace verticale, et la trace verticale à la projection verticale de la trace horizontale.*

Deuxième problème.

Etant données les traces de deux plans, trouver les projections de leur intersection.

Soient VH, V'H' (*fig.* 10) les traces de deux plans.

L'intersection de ces deux plans étant située dans le plan VH, ne peut rencontrer le plan vertical de projection qu'en un point de V (*G. E.*, liv. V).

Cette droite étant aussi située dans le plan V'H', ne peut

rencontrer le plan vertical de projection qu'en un point de V'. Ne pouvant rencontrer le plan vertical qu'en un point de V et un point de V', elle le rencontre à leur intersection *b*.

On démontre de même qu'elle rencontre le plan horizontal au point *a* d'intersection des traces horizontales H et H' des deux plans donnés.

Connaissant les traces *a* et *b* de la droite cherchée, on détermine ses projections d'après les règles du problème précédent.

Troisième problème.

Trouver les projections du point de rencontre d'une droite et d'un plan.

Soient V, H (*fig.* 11) les traces d'un plan; D^v, D^h, les projections d'une droite D.

La droite est tout entière dans le plan qui la projette sur le plan horizontal de projection. Elle ne peut donc rencontrer le plan VH qu'en un point de l'intersection de ces deux plans (*G. E.*, liv. V).

Or, les traces du plan projetant sont D^h et $b^h b$, *a* et *b* sont alors les traces de l'intersection des deux plans. Déterminant les projections d'après les règles du problème précédent, nous trouvons J^v et J^h sur D^h. La droite D est située avec J dans le même plan $a b^h b$, donc elles se rencontrent, et le point m^v d'intersection de leurs projections verticales est la projection verticale de leur point de rencontre ; abaissant de m^v une perpendiculaire sur la ligne de terre, et la prolongeant jusqu'à la rencontre de D^h, les deux points m^v et m^h sont les points cherchés.

Comme vérification de l'épure de ce problème, on peut déterminer la projection horizontale de la droite d'intersection du plan VH avec le plan qui projette D sur le plan vertical.

Quatrième problème.

Trouver les projections du point d'intersection de trois plans donnés.

La solution de ce problème est tout entière renfermée dans celle des deux problèmes précédents.

Elle consiste à déterminer 1° les projections de la droite d'intersection de deux des trois plans donnés; 2° les projections du point d'intersection de cette droite avec le troisième plan.

Cinquième problème.

Trouver la distance de deux points dont on connaît les projections.

Supposant un plan conduit suivant les deux perpendiculaires abaissées de chacun de ces points pour déterminer leurs projections horizontales, la distance entre ces points est *l'hypothénuse du triangle rectangle construit sur la distance entre les projections horizontales de ces points et la différence entre les hauteurs des projections verticales au-dessus de la ligne de terre.*

Sixième problème.

Etant donnée la projection horizontale d'une droite, située dans un plan, trouver sa projection verticale.

Soit un plan VH et une droite D.

La droite D, étant située dans le plan V H, a ses traces sur celles de ce plan. De même, cette droite étant située dans le plan qui la projette sur le plan horizontal de projection, a ses traces sur celles de ce plan. Les traces de D devant se trouver chacune sur deux lignes situées dans un même plan, sont à leur intersection.

Connaissant les traces de la droite D, on a ses projections par la méthode ordinaire.

Septième problème.

Par un point donné, mener un plan parallèle à un plan donné.

Deux droites qui se coupent déterminent un plan. Le problème consiste donc à mener par le point donné deux droites parallèles au plan donné ; déterminer les traces de ces droites et les joindre par des droites qui sont les traces du plan cherché. Car tout plan conduit suivant deux droites parallèles à un plan donné est parallèle à ce plan. (*G. E.*, liv. V.)

L'épure s'effectue très-simplement si l'on remarque que, les traces de deux plans parallèles étant parallèles entre elles, il suffit de connaître un point des traces cherchées pour les avoir toutes deux.

A cet effet, soient V H (*fig.* 12) les traces d'un plan, m^v, m^h les projections d'un point m situé dans l'espace. Par le point m on mène une parallèle à la trace horizontale H du plan V H; cette parallèle a pour projections D^v, D^h menées par m^v et m^h, parallèles aux projections de H qui sont H et L T (car toute

droite située dans un des plans de projection est elle-même sa projection dans ce plan et a pour projection, dans l'autre plan, la ligne de terre).

On détermine la trace verticale *b* de D et on mène par *b* une parallèle V' à V, puis par le point de rencontre de V' avec la ligne de terre, une parallèle H' à H. V' et H' sont les traces du plan demandé.

On peut vérifier l'exactitude de l'épure en menant par le point *m* une parallèle à V qui devra avoir sa trace horizontale en *a*.

Huitième problème.

Par un point et par une droite, ou par trois points donnés, faire passer un plan.

Trois droites qui se coupent, ou deux parallèles (*G. E.*, liv. V), déterminent la position d'un plan. Il n'y a donc qu'à amener l'une ou l'autre de ces deux circonstances pour résoudre ce problème. Les traces du plan sont les droites de jonction des traces des droites dans chacun des plans de projection.

Neuvième problème.

Par un point donné, mener un plan parallèle à deux droites données.

Lorsqu'une droite est parallèle à une autre droite située dans un plan, elle est parallèle au plan.

Par le point donné on mène deux droites parallèles aux deux droites données, et les droites de jonction des traces de ces deux parallèles sont les traces du plan cherché. Car les deux droites données sont chacune parallèle à une droite située dans le plan.

Dixième problème.

Faire passer une droite par un point et deux droites données.

Une droite est déterminée par l'intersection de deux plans.

Par le point et l'une des droites données on fait passer un plan (*Probl.* 8).

Par le point et la seconde droite donnée, on fait passer un plan.

Les deux plans se coupent suivant une droite qui est la droite demandée.

Car 1° elle passe par le point donné, puisque ce point est à la fois dans les deux plans, c'est-à-dire à leur intersection;

2° Elle rencontre chacune des deux droites, car elle est située à la fois dans deux plans qui contiennent chacun une de ces droites.

Onzième problème.

D'un point pris hors d'un plan abaisser une perpendiculaire sur ce plan, et trouver: 1° le pied de cette perpendiculaire; 2° la longueur de cette perpendiculaire.

Soient V H (*fig.* 13) les traces d'un plan; m^v, m^h les projections d'un point.

Nous avons dit que les projections d'une droite perpendiculaire à un plan étaient perpendiculaires aux traces de ce plan. Donc D^v D^h abaissées de m^v et m^h perpendiculairement sur V et H sont les projections de la droite demandée.

Le pied m' de la perpendiculaire est le point de rencontre de la droite D avec le plan V H (*Probl.* 3). La longueur $m\,m'$ de la perpendiculaire est l'hypothénuse d'un triangle rectangle (*Probl.* 5).

Douzième problème.

Par un point donné mener un plan, puis une droite perpendiculaire à une droite donnée.

Les traces du plan cherché sont perpendiculaires aux projections de la droite donnée. Menons par le point donné une parallèle à la trace horizontale du plan cherché; cette parallèle est dans ce plan, et ses projections sont parallèles aux projections de la trace horizontale inconnue, c'est-à-dire la projection verticale parallèle à la ligne de terre, et la projection horizontale perpendiculaire à la projection horizontale de la droite donnée.

Déterminant la trace verticale de cette ligne auxiliaire, on a un point de la trace verticale du plan cherché, ce qui est suffisant pour mener ses deux traces.

La seconde partie du problème consiste à déterminer le point de rencontre de la droite donnée avec le plan qui lui est perpendiculaire (*Probl.* 3), puis à joindre ce point au point donné. Car lorsqu'une droite est perpendiculaire à un plan, elle est perpendiculaire à toute droite passant par son pied dans le plan. (*G. E.*, liv. V.)

Treizième problème.

Trouver les angles que fait une droite avec les plans de projection.

L'angle d'une droite et d'un plan est l'angle de cette droite avec sa projection sur ce plan. Il suffit donc, pour avoir les angles d'une droite avec les plans de projection, de déterminer

tes, on fait passer un plan, l'une d'elles étant perpendiculaire au plan donné, ce plan est aussi perpendiculaire au plan donné, et son intersection avec ce dernier forme avec la droite donnée l'angle cherché.

Il suffit donc, pour résoudre ce problème, de déterminer les projections du point de rencontre de la droite donnée avec le plan donné, puis, élevant par ce point une perpendiculaire au plan donné (*Probl.* 11), déterminer l'angle de ces deux droites (*Probl.* 15), dont on prend le complément pour avoir l'angle de la droite avec le plan.

Dix-septième problème.

Construire la plus courte distance entre deux droites.

Soient, en perspective, D, D' (*fig.* 15) deux droites situées dans l'espace.

La distance entre ces deux droites est la même que celle qui existe entre la droite D' et le plan conduit suivant D parallèlement à D'.

Prenant donc sur D un point *a*, on mène par ce point une parallèle D'' à D'. Par D et D'' on fait passer un plan (*Probl.* 8). D'un point *b* pris sur D' on abaisse une perpendiculaire P sur ce plan (*Probl.* 11). La longueur *be* est la distance demandée.

En effet, par *c*, pied de la perpendiculaire P, si on mène D''' parallèle à D'' et D', cette droite rencontre D en *d*. Élevant par le point *d* une perpendiculaire P' au plan, ou menant une parallèle à P, alors cette droite rencontre D' en *e*. La figure *bcde* est un rectangle forcé, ses quatre côtés étant parallèles deux à deux; donc :

1° $de = bc$;

2° *de* est perpendiculaire à la fois sur D et sur D'.

DEUXIÈME SÉRIE.

PROBLÈMES SUR LES SURFACES COURBES ET LES PLANS TANGENTS

Parmi toutes les surfaces courbes que l'on peut engendrer régulières ou irrégulières, il en est trois espèces qui sont d'u usage fréquent dans les arts, et que nous étudierons ici, (sont :

1° Les *surfaces développables ;*

2° Les *surfaces de révolution ;*

3° Les *surfaces gauches.*

Les *surfaces développables* sont engendrées par une droi

qui glisse sur une courbe quelconque, soit parallèlement à elle-même, soit en passant toujours par un même point.

Si l'on considère la courbe comme un polygone d'un nombre infini de côtés, la surface engendrée dans le premier cas, se compose d'une infinité de rectangles, d'une longueur indéfinie, et celle engendrée dans le second se compose d'une infinité de triangles opposés deux à deux par le sommet. Les rectangles et les triangles étant des surfaces planes, toute surface qui n'est composée que de ces deux figures peut se développer sur un plan. De là le nom de *surfaces développables*.

On en distingue deux :

Le *cylindre* et le *cône*.

Les *surfaces de révolution* sont engendrées par une courbe tournant autour d'un axe, de manière que chacun de ses points décrive une circonférence autour de cet axe.

On nomme plan *méridien*, tout plan qui coupe la surface en passant par l'axe ; et courbe *méridienne*, l'intersection de ce plan avec la surface.

On nomme plan *parallèle*, tout plan qui coupe la surface perpendiculairement à l'axe. Les plans parallèles sont tous des cercles.

Les *surfaces gauches* sont engendrées par une droite qui se meut sur une ou plusieurs autres lignes, soit droites soit courbes, en satisfaisant à certaines conditions, sans que jamais deux positions infiniment voisines de la droite génératrice soient dans le même plan.

Les surfaces gauches les plus importantes et les plus utiles, sont les suivantes :

L'*hyperboloïde à une nappe ;*

Le *paraboloïde hyperbolique ;*

Le *conoïde*.

Un plan peut être tangent de deux manières différentes, savoir :

1° Ayant un seul point de contact ;

2° Suivant une droite génératrice de la surface.

Le contact a lieu suivant une droite, pour toutes les surfaces engendrées par des droites, soit *développables*, soit *gauches ;* aussi ces deux genres de surfaces sont-ils compris sous la dénomination unique de *surfaces réglées*.

Le contact a lieu en un seul point pour toutes les autres surfaces.

§ 1er. — PLANS TANGENTS AUX SURFACES DÉVELOPPABLES.

Premier problème.

Etant données les projections de la courbe directrice d'un cylindre et celles d'une droite parallèle aux génératrices, trouver les projections de la génératrice passant par un point dont on connaît seulement une projection.

Soient C^v, C^h (*Pl.* Ire, *fig.* 16) les projections d'une courbe directrice; D^v, D^h les projections d'une droite parallèle aux génératrices; m^h la projection horizontale d'un point m situé sur la surface.

Le point m étant situé sur la surface, la projection horizontale de la génératrice passant par ce point est G^h menée par m^h parallèlement à D^h. G^h rencontre C^h en m'^h qui est la projection horizontale du point de rencontre de G avec la directrice; m'^v en est la projection verticale.

Par m'^v on mène G^v parallèle à D^v, et on a en $G^v G^h$ les projections de la génératrice demandée, m^v est la projection verticale du point m.

Deuxième problème.

Mener un plan tangent au cylindre par un point pris sur la surface.

Un plan est déterminé par deux droites qui se coupent.

Or le plan tangent au cylindre contient :

1o La génératrice passant par le point donné ;

2o Toutes les tangentes aux sections faites dans le cylindre aux points de rencontre avec la génératrice passant par le point donné.

Il contient donc la tangente à la courbe directrice, dont les projections s'obtiennent en menant des tangentes aux projections de cette courbe.

Connaissant deux droites situées dans le plan tangent, il suffit de joindre les traces de ces droites deux à deux pour avoir les traces du plan cherché.

Troisième problème.

Mener un plan tangent au cylindre par un point extérieur.

Deux droites parallèles déterminent la position d'un plan.

Soient C^v, C^h (*fig.* 17) les projections de la directrice; D^v, D^h, celles d'une droite parallèle aux génératrices; m^v m^h celles d'un point extérieur.

Par le point m, on mène D' parallèle aux génératrices; on détermine les traces et on a un point a, dans le plan horizontal, et un point b, dans le plan vertical de chacune des traces du plan cherché. Si on connaissait les projections de la génératrice de contact, le problème serait résolu. Pour trouver ces projections, on remarque que le plan tangent devant contenir les tangentes à toutes les sections, faites dans le cylindre, au point de rencontre avec la génératrice de contact; la trace horizontale de ce plan devra être tangente à la trace horizontale du cylindre. On détermine cette dernière en prenant plusieurs points très-voisins sur la courbe directrice et menant par ces points des génératrices dont on détermine les traces horizontales qu'on joint par une courbe. Soit C' cette courbe, on mène la tangente $a\,c$, et on a la trace horizontale H^t du plan tangent. Pour avoir la trace verticale, on détermine les projections de la génératrice, dont c est la trace horizontale, et on obtient dans le plan vertical un second point de la trace verticale V^t du plan tangent.

Quatrième problème.

Mener un plan tangent à un cylindre parallèlement à une droite donnée.

Par un point de la droite on mène une parallèle aux génératrices. Suivant les deux droites qui se coupent, on fait passer un plan. Ce plan est parallèle au plan tangent cherché : car, 1° il est parallèle à un plan tangent puisqu'il contient une droite parallèle aux génératrices;

2° Le plan tangent est parallèle à la droite donnée puisqu'il est parallèle à ce plan.

Or, les traces de deux plans parallèles sont parallèles entre elles. La trace horizontale du plan tangent est à la fois parallèle à la trace horizontale du plan parallèle, et tangente à la trace horizontale du cylindre. Déterminant cette dernière, comme dans le problème précédent, il ne reste plus qu'à mener une tangente à une courbe donnée parallèlement à une droite donnée, ce qui se fait graphiquement. La trace horizontale connue, on a la trace verticale, soit en déterminant la trace verticale de la génératrice de contact, soit en menant une parallèle à la trace verticale du plan parallèle par le point de rencontre de la trace horizontale avec la ligne de terre.

Plans tangents au cône.

Les quatre problèmes que nous venons de résoudre pour le

cylindre, s'appliquent également au cône. La solution est la même, aux exceptions suivantes près :

1° Un cône est représenté par les projections de la courbe directrice et les projections de son sommet. Les projections des génératrices doivent toutes passer par celles du sommet ;

2° Au lieu de mener des droites parallèles aux génératrices, on mène des droites passant par le sommet du cône.

§ 2. — PLANS TANGENTS AUX SURFACES DE RÉVOLUTION.

Premier problème.

Etant données les projections de l'axe, celles de la courbe génératrice et l'une des projections d'un point situé sur une surface de révolution, trouver l'autre projection de ce point.

Soient C^v, C^h (*fig.* 18) les projections de la courbe génératrice ; A, A^v, celles de l'axe vertical ; m^h, la projection horizontale d'un point m situé sur la surface.

La projection verticale du point m sera sur la perpendiculaire abaissée de m^h sur la ligne de terre, et prolongée indéfiniment au-dessus. Elle sera aussi sur la projection verticale du parallèle passant par ce point et ayant pour projection horizontale la circonférence P^h décrite du point A, comme centre, avec Am^h pour rayon. Ce parallèle rencontre la courbe génératrice en un point dont la projection horizontale est a^h, intersection de P^h et C^h ; on projette verticalement a^h en a^v, par lequel point on mène perpendiculairement à A^v la ligne P^v, projection verticale du parallèle P. On obtient ainsi m^v pour projection verticale du point qui a pour projection horizontale m^h.

Suivant la forme de la courbe génératrice on obtient un, deux, trois, etc., points dans le plan vertical, qui satisfont à la question.

Deuxième problème.

Mener un plan tangent à une surface de révolution par un point pris sur cette surface.

Soient, comme ci-dessus, C^v, C^h, A^v, A, m^v, m^h, (*fig.* 19).

Le plan tangent à la surface au point m contient les tangentes en ce point à toutes les sections faites dans la surface par ce point. Il contient donc la tangente au parallèle, celle au méridien qui est inconnu, et celle à la courbe génératrice passant par m.

Lorsque le méridien est connu, il suffit de sa tangente et de

celle du parallèle pour déterminer le plan. Lorsqu'il est inconnu, ce sont les tangentes au parallèle et à une génératrice qui servent.

La tangente au parallèle a pour projection t^h tangente à P^h et l'horizontale t^v, trace verticale du plan parallèle. La trace verticale de t est b.

La tangente à la génératrice passant par le point m est plus difficile à obtenir. Par le point a de rencontre du parallèle P avec la courbe génératrice C, on mène une tangente à cette courbe, et on obtient les deux projections de t'^v, t'^h, tangentes aux projections de C. La tangente t', en tournant avec la courbe génératrice C, engendre un *hyperboloïde de révolution à une nappe.*

La trace horizontale c de t' décrit une circonférence C' autour du point A. Du point m, comme centre, avec $a^h c$ pour rayon, on décrit un arc de cercle qui rencontre C' en un point d. Le point d est la trace horizontale de la tangente à la courbe génératrice passant par le point m; car cette tangente est l'hypothénuse du triangle rectangle qui a $m^h d = a^h c$ pour base, et $m^v p = a^v q$ pour hauteur. Connaissant la trace horizontale de t'' et sachant qu'elle passe par le point m, on obtient facilement ses projections et traces verticales, et, partant, les traces V H du plan tangent cherché.

Troisième problème.

Mener un plan tangent à une surface de révolution par un point extérieur,

Si l'on considère le point donné comme le sommet d'un cône tangent à la surface de révolution, tous les plans tangents à ce cône satisferont à l'énoncé du problème.

Il faut donc établir une seconde condition pour que le plan soit déterminé de position.

Les diverses conditions que l'on peut s'imposer pour ce problème sont les suivantes :

1° *Le plan tangent devra avoir son point de contact sur un méridien donné;*

2° *Le plan tangent devra avoir son point de contact sur un parallèle donné;*

3° *Le plan tangent devra être parallèle à une droite donnée.*

Nous allons examiner successivement chacun de ces cas.

1° *Point de contact sur un méridien donné.*

Soient A, A^v (*fig.* 20) l'axe d'une surface de révolution; m^v, m^h un point extérieur.

Nous dirons, en premier lieu, que le contact devant avoir lieu sur une courbe méridienne donnée, il est nécessaire, pour résoudre le problème, de connaître l'intersection de la surface par un plan méridien. Soit donç cette intersection connue, et représentons-la en vraie grandeur par la courbe C, ayant, par conséquent, pour projection horizontale C^h, trace d'un plan méridien parallèle au plan vertical de projection.

Soit H^m la trace horizontale du plan méridien sur lequel doit avoir lieu le contact.

Le plan tangent cherché doit être perpendiculaire au plan méridien sur lequel a lieu le contact, et comme il passe par le point *m*, il contient la perpendiculaire abaissée de ce point sur le plan H^m (*G. E.*, liv. V).

Son intersection avec le plan H^m est la tangente à la courbe méridienne au point de contact.

Il résulte de là que si nous déterminons les traces de la perpendiculaire abaissée du point *m* sur le plan H^m et celles de la tangente au point de contact, nous aurons tous les éléments nécessaires pour déterminer les traces du plan tangent.

Du point m^h j'abaisse P^h perpendiculaire sur H^m (*fig.* 20); par le point m^v je mène P^v parallèle à la ligne de terre; $P^v P^h$ sont les projections de la perpendiculaire demandée, et *b* est sa trace verticale.

Cette droite P rencontre le plan méridien H^m en un point *a*. Faisant tourner le plan H^m autour de l'axe A comme charnière, jusqu'à temps qu'il vienne coïncider avec le plan H'^m parallèle au plan vertical, le point a^h viendra en a^{hr}, et le point a^v en a^{vr}. L'intersection de la surface de révolution par le plan H^m sera rabattue en C^r.

La tangente menée par *a* à la courbe *c* sera une tangente au point de contact. Car 1° elle sera tangente à la courbe méridienne donnée; 2° elle sera tout entière dans le plan tangent, le point *a* y étant, et la tangente à la courbe méridienne étant, par hypothèse, l'intersection du plan H^m avec le plan tangent cherché.

La tangente à la courbe méridienne, menée par le point *a*, est rabattue en t^{vr} ayant son point de contact en n^{vr}. Ramenant le plan méridien dans sa première position, a^{hr}, n^{hr} viennent en a^h, n^h, et a^{vr}, n^{vr} en a^v, n^v. Joignant $a^v n^v$ nous obtenons t^v; t^h doit se trouver sur H^m. Nous déterminons les traces de *t*.

Connaissant les traces de deux droites situées dans le plan

tangent, nous obtenons celles de ce dernier en les joignant par des droites.

Ce problème a plusieurs solutions, suivant la forme de la courbe méridienne.

2° *Contact sur un parallèle donné.*

Le problème est plus simple et se ramène, par une petite construction, à celui du plan tangent au cône par un point extérieur.

Les données sont les mêmes que précédemment. Il faut connaître l'intersection de la surface par un plan méridien parallèle au plan vertical de projection. Le plan méridien donné est remplacé par un plan parallèle.

Par le point de rencontre de la trace verticale du plan parallèle avec la courbe méridienne, on mène une tangente à cette courbe. Cette tangente rencontre l'axe en un point que l'on considère comme le sommet d'un cône de révolution tangent, dont le contact a lieu sur le parallèle donné. On détermine la section circulaire de ce cône par le plan horizontal, puis on lui mène un plan tangent par le point donné.

3° *Parallèlement à une droite donnée.*

Pour résoudre ce problème, on détermine la projection de la courbe de contact d'un cylindre tangent à la surface de révolution et ayant ses génératrices parallèles à la droite donnée. Tout plan tangent à ce cylindre sera :

1° tangent à la surface de révolution ;
2° parallèle à la droite donnée.

Le problème à résoudre se trouve donc ainsi converti en celui-ci : mener un plan tangent au cylindre par un point extérieur.

Pour déterminer la courbe de contact d'un cylindre tangent à une surface de révolution, il faut avoir recours à des intersections de surface par des plans, chose que nous verrons plus loin et que nous croyons inutile d'indiquer ici.

§ 3. — PLANS TANGENTS AUX SURFACES GAUCHES.

Premier problème.

Etant donnée la projection horizontale d'un point situé sur une surface gauche, trouver sa projection verticale ainsi que les projections de la génératrice passant par ce point.



1° *Hyperboloïde à une nappe.*

On donne ce nom à une surface engendrée par une génératrice qui se meut sur trois droites, appelées direc non parallèles à un même plan.

Cette surface jouit de la propriété suivante :

Si, prenant pour *directrices* trois *génératrices* quelconq la surface, on fait mouvoir une droite sur ces trois l la nouvelle surface engendrée coïncidera avec la premièr toute son étendue, et ne formera qu'une seule et mêm face.

Il résulte de là que l'on considère deux systèmes de ration de cette surface, et les droites qui sont consi comme génératrices dans l'un, sont directrices dans l'

Un cas particulier de l'hyperboloïde à une nappe est l *face gauche* de révolution qui s'engendre communémen faisant tourner une droite autour d'une autre non situé le même plan. Si l'on prend trois génératrices quelconq la surface ainsi engendrée, et fait mouvoir dessus une d elle engendre la même surface.

Nous énonçons simplement tous ces faits, en laissant l monstration aux traités spéciaux de géométrie descripti

On appelle *collier*, dans la surface gauche de révol la plus petite des circonférences décrites par les point droite mobile; le point qui décrit cette circonférence pied de la perpendiculaire commune à cette droite et (*Probl.* 17, 1re série).

Tout plan, parallèle à l'axe, conduit suivant cette est tangent au collier, et si l'axe est vertical, la trace zontale de ce plan est tangente à la projection horizon collier. Il en résulte que les projections des génératric tangentes à la projection du collier.

Soient A, A^v (*Pl.* I, *fig.* 21) l'axe; C^v, C^h le collier; une génératrice, parallèle au plan vertical, d'une hy loïde de révolution à une nappe; m^h la projection hori d'un point situé sur cette surface.

Le point *m* est situé sur une génératrice de chaq tème de génération, sa projection horizontale est donc projection horizontale d'une génératrice de chaque sy Les projections horizontales étant tangentes à celle du C^h, par le point m^h on mène deux tangentes à C^h.

On détermine la trace *a* de la génératrice G, et du



comme centre, avec Aa pour rayon, on décrit une circonférence qui est la trace de la surface gauche sur le plan horizontal. La génératrice G' a sa trace horizontale en a', elle rencontre en b le collier, donc $a'^v\, b$ ou G^v est sa projection verticale, d'où on déduit m^v.

Lorsque l'hyperboloïde à une nappe n'est pas de révolution, la solution est la même que pour la paraboloïde hyperbolique que nous allons voir.

2° *Paraboloïde hyperbolique.*

On donne ce nom à une surface engendrée par une droite se mouvant sur deux droites, en restant parallèle à un plan nommé *plan directeur*. Elle est aussi engendrée par une droite se mouvant sur trois directrices parallèles à un même plan.

Pour l'hyperboloïde à une nappe et la paraboloïde hyperbolique, il ne suffit pas d'avoir la projection horizontale d'un point situé sur la surface, pour obtenir ses projections de la génératrice qui le contient, il faut encore que ce point soit situé sur une directrice de la surface.

Alors, on obtient les projections de la génératrice passant par ce point, de la manière suivante :

Par le point et l'une des deux autres directrices, on fait passer un plan qui rencontre la première directrice en ce point, et la troisième en un point que l'on détermine par construction. On joint les deux points de rencontre par une droite qui, étant située dans le même plan que la seconde directrice, la rencontre. Cette droite, rencontrant à la fois les trois directrices, est une génératrice de la surface.

Deuxième problème.

Mener un plan tangent à l'hyperboloïde à une nappe de révolution, en un point donné de sa surface.

Ce plan contient :

1° La génératrice du premier système passant par le point ;

2° La génératrice du second système passant par le point ;

3° La tangente à la circonférence passant par le point.

Ces trois droites sont facilement déterminées ainsi que les traces du plan cherché.

Troisième problème.

Mener un plan tangent à l'hyperboloïde ou à la paraboloïde, par un point pris sur une directrice.

Après avoir déterminé les projections de la génératrice



passant par le point, sachant que les génératrices d'un sy
sont les directrices de l'autre système, on fait passer un
par la directrice et la génératrice passant par le point d

Si c'est par un autre point de la génératrice ainsi déter
qu'on veut mener le plan tangent, on prend deux
points sur l'une des directrices, et l'on détermine deux
velles génératrices. Considérant ensuite les trois généra
comme directrices, on mène par le nouveau point une
ratrice de l'autre système, c'est-à-dire une droite qui
contre les trois nouvelles directrices; puis, par les deux d
qui se coupent, au point donné, on fait passer un pla
est le plan cherché.

TROISIÈME SÉRIE.

PROBLÈMES SUR LES INTERSECTIONS DE SURFACES.

On distingue deux espèces d'intersections de surfaces

1° Les intersections de surfaces courbes par des plans

2° Les intersections de surfaces courbes entre elles.

§ 1er. — INTERSECTIONS DE SURFACES COURBES PAR PLANS.

Premier problème.

Trouver les projections de l'intersection d'un cylindre conque par un plan quelconque.

Soient C^v C^h (*fig.* 22) les projections de la courbe trice d'un cylindre; D^v D^h celles d'une droite parallèl génératrices; V H les traces d'un plan.

L'intersection du cylindre avec le plan n'est autre lieu géométrique des points d'intersections des génér de la surface avec ce plan.

Soient donc m^v m^h les projections d'un point *m* situé on mène par ce point la génératrice G. Cette génératric contre le plan donné au point *m'*, qui est un point courbe demandée. Cette construction répétée un nomb fisant de fois donne assez de points pour tracer les proj de la courbe.

Lorsque l'on veut avoir la courbe en vraie grandeur, rabat sur l'un des plans de projection, en faisant tou plan V H autour de sa trace dans ce plan, comme cha Soit, par exemple, proposé de rabattre la courbe sur l horizontal de projection.

Pour rabattre le point *m'*, on suppose par ce point u



mené perpendiculairement à la trace horizontale H de V H; ce plan a pour trace horizontale $m'^h a$. L'intersection de ce plan avec le plan VH est la droite am' située dans l'espace. Cette droite, distance du point a de la charnière au point m', est l'hypothénuse du triangle rectangle $a\,m'^h\,b$, ayant pour base $a\,m'^h$, et pour hauteur $m'^h\,b = m'^v\,p$, hauteur du point m' au-dessus du plan horizontal de projection.

Du point a, comme centre, avec $a\,b$ pour rayon, on décrit un arc de cercle, qui vient rabattre le point m' en m'^r sur la trace horizontale du plan perpendiculaire de la ligne de terre. On rabattra de la même manière les autres points.

Scholie. On peut se donner le plan et le cylindre dans des positions plus simples que celles que nous avons envisagées ici : alors la solution se simplifie aussi.

Deuxième problème.

Trouver les projections de l'intersection d'un cône quelconque par un plan quelconque.

Soient S^v, S^h (*fig.* 23) les projections du sommet d'un cône; C^v C^h celles de la courbe directrice; V H les traces d'un plan sécant.

On prend un point m sur C; par ce point on mène la génératrice G, qui rencontre le plan VH au point m'. On détermine un certain nombre de points tels que m', puis on joint leurs projections par des courbes pour avoir les projections de la courbe cherchée.

Le rabattement se fait de la même manière que pour le cylindre.

Troisième problème.

Trouver les projections de l'intersection d'une surface de révolution par un plan quelconque.

Soient A A^v (*fig.* 24) l'axe, et C^v C^h la courbe génératrice d'une surface de révolution ; V H les traces d'un plan quelconque.

On coupe tout le système par une série de plans horizontaux V', V'', V''', etc., dont les intersections avec la surface de révolution sont des cercles, et, avec le plan VH, des droites.

Soient m^v m^h les projections du point de rencontre de V'' avec C. Du point A, comme centre, avec A m^h pour rayon, on décrit une circonférence, qui est la projection horizontale de l'intersection de V'' avec la surface du point b de rencontre de V avec V''; on abaisse la perpendiculaire $b\,b^h$, et par le point b^h



on mène J^h parallèle à H. J^h est la projection horizontal V'' avec V H. La circonférence C' et la droite J étant sit dans un même plan se rencontrent en deux points *m'*, qui appartiennent à la courbe dont nous cherchons les jections; car ces deux points sont situés à la fois sur le V H et sur la surface de révolution.

Quatrième problème.

Trouver les projections de l'intersection d'une hyperboloïd révolution à une nappé par un plan quelconque.

Soient A^v A (*fig.* 25) l'axe, et G^v G^h les projections de la nératrice parallèle au plan vertical de projection; V H traces d'un plan.

On coupe tout le système par une série de plans paral au plan horizontal. Chacun de ces plans coupe la su suivant un cercle, et le plan V H suivant une droite. S m^v m^h les projections du point *m* d'intersection de la gé trice G avec le plan V'. Du point A, comme centre, avec pour rayon, on décrit une circonférence qui est la pr tion horizontale de l'intersection de la surface par le pla Du point *b* de rencontre de V' avec V, on abaisse la perp culaire $b\,b^h$ sur la ligne de terre. Par le point b^h on mène J rallèle à H. La droite J et la circonférence C étant si dans le même plan V', se rencontrent en deux points *m'*, qui appartiennent à la courbe cherchée, puisqu'ils sont à la fois sur la surface et sur le plan V H.

Cinquième problème.

Trouver les projections de l'intersection d'une hyperb quelconque par un plan quelconque.

Soient D, D', D'' (*fig.* 26) les trois directrices d'une hyp loïde à une nappe; V H les traces d'un plan. Pour avoi tersection du plan donné avec la surface gauche, il su déterminer les points de rencontre d'un nombre suffisa génératrices avec ce plan. Soit donc *m* un point sur la trice D'': on mène par *m* une parallèle à D; puis, par ce parallèles, on fait passer un plan qui rencontre D' en joint *m m'*, et on a une génératrice G de la surface qui ren V H en M.

On détermine ainsi un certain nombre de points, te M, auxquels on peut ajouter ceux de rencontre des dire D, D', D'' avec le plan V H.

La même construction, plus simple, a lieu pour l'intersection d'une paraboloïde hyperbolique par un plan quelconque.

§ 2. — INTERSECTIONS DES SURFACES COURBES ENTRE ELLES.

Premier problème.

Trouver les projections de l'intersection de deux cylindres quelconques.

Première Méthode. — Si l'on connaît les traces des cylindres sur le plan horizontal, les intersections de ces cylindres par des plans, parallèles au plan horizontal, sont des courbes égales à leurs traces horizontales, et les points d'intersection de ces courbes entre elles sont des points de la courbe cherchée. Cette méthode convient lorsque la trace horizontale de chaque cylindre est un cercle ou un arc de cercle.

Deuxième Méthode. — Chaque point de la courbe de rencontre est l'intersection de deux génératrices, l'une du premier, l'autre du second cylindre. Ces deux génératrices déterminent un plan dont la trace horizontale est la droite qui unit leurs traces.

Réciproquement, si par un point extérieur on mène un plan parallèle à la fois aux génératrices du premier et aux génératrices du second cylindre, tout plan parallèle à ce plan coupe les deux cylindres chacun suivant une de ses génératrices, et les génératrices qui se trouvent dans le même plan donnent, à leur intersection, un point de l'intersection des deux cylindres.

Le problème consiste donc à mener par un point extérieur deux droites parallèles, l'une aux génératrices du premier, l'autre aux génératrices du second cylindre; puis faisant passer un plan par ces deux droites, à mener les traces horizontales, seulement, d'une série de plans parallèles à ce plan, lesquelles rencontreront les traces horizontales des cylindres en un, deux, trois des points correspondants à autant de génératrices et de points de rencontre des deux surfaces.

Deuxième problème.

Trouver les projections de l'intersection de deux cônes quelconques.

Tout plan passant par le sommet d'un cône, coupe ce dernier suivant une ou plusieurs génératrices, suivant la forme de sa surface.

Si donc on fait passer une droite par les sommets des deux cônes donnés, tout plan conduit suivant cette droite coupe chacun des deux cônes suivant des génératrices. Les points de rencontre dans ce plan des génératrices du premier cône avec les génératrices du second sont des points de la courbe cherchée.

Pour résoudre ce problème, comme pour le précédent, il faut connaître les traces des deux cônes. Alors la trace horizontale de la droite qui joint leurs sommets étant déterminée, il suffit de mener par cette trace un nombre suffisant de droites rencontrant les traces des deux cônes.

Ces droites sont les traces horizontales de plans sécants, et donnent par leurs points d'intersection avec les traces des cônes autant de génératrices, et partant, autant de points de rencontre qu'il y a de ces points sur une seule d'entre ces deux dernières.

Troisième problème.

Trouver les projections de l'intersection d'un cylindre et d'un cône quelconque.

La solution de ce problème découle de celle des deux problèmes précédents.

Par le sommet du cône on mène une droite parallèle aux génératrices du cylindre; tout plan conduit suivant cette droite coupe d'une part le cône, d'autre part, le cylindre suivant une ou plusieurs génératrices. Les intersections des génératrices situées dans les mêmes plans sont des points de l'intersection des deux surfaces.

Quatrième problème.

Trouver les projections de l'intersection d'un cylindre quelconque et d'une surface de révolution.

La solution la plus générale de ce problème consiste à avoir recours à la première méthode pour l'intersection de deux cylindres, parce que l'intersection d'une surface de révolution, par un plan horizontal, est une circonférence, tandis que par tout autre plan elle exige de nombreuses constructions pour être déterminée.

Etant donc donnée la trace horizontale du cylindre, on coupe tout le système par une série de plans horizontaux. Ces plans coupent le cylindre suivant des courbes égales à la trace de ce dernier, et dont la position se détermine facilement au moyen d'une ou deux génératrices auxiliaires; ils coupent éga-

lement la surface de révolution suivant des cercles dont les rayons sont facilement déterminés. Les points d'intersection des courbes situées dans le même plan, donnent des points de l'intersection cherchée.

Cinquième problème.

Trouver les projections de l'intersection d'un cône et d'une surface de révolution.

La solution est la même que pour le cylindre et la surface de révolution, à cette exception près, que les intersections du cône par des plans horizontaux sont des courbes semblables à la trace de ce dernier sur le plan horizontal. Lorsque cette trace est un arc de cercle, il est facile de construire l'arc de cercle semblable correspondant à un plan horizontal considéré; mais si cette courbe est quelconque, alors la solution du problème est très-longue.

Sixième problème.

Trouver les projections de l'intersection de deux surfaces de révolution.

On peut toujours supposer que l'axe de l'une des surfaces est perpendiculaire au plan horizontal de projection, alors il peut se présenter trois cas :

1° Ou les deux axes sont parallèles;

2° Ou les deux axes se rencontrent;

3° Ou les deux axes ne se rencontrent pas.

1° Lorsque les deux axes sont parallèles, l'un d'eux étant perpendiculaire au plan horizontal de projection, l'autre l'est aussi ; alors toutes les intersections par des plans parallèles au plan horizontal sont des cercles dont les intersections appartiennent à la courbe demandée.

2° Lorsque les deux axes se rencontrent, on procède de la manière suivante :

Soient A, A' (*fig.* 27) les axes de deux surfaces de révolution se coupant au point *m*. Suivant ces axes, on fait passer un plan qui coupe le plan horizontal suivant A A', et on mène la ligne de terre parallèle à A A', d'où résulte que le plan vertical de projection est parallèle au plan conduit suivant les deux axes A et A'.

Soient $C^v C'^v$ les projections sur le plan vertical des intersections des surfaces de révolution par ce plan.

Pour obtenir des points de rencontre des deux surfaces, on considère le point *m* comme centre d'un nombre suffisant de

sphères de différents rayons. Toutes ces sphères rencontrent chacune des surfaces de révolution suivant un cercle, et les intersections des circonférences de ces cercles pris deux à deux sur la même sphère sont des points de la courbe demandée.

Pour déterminer deux cercles situés sur une même sphère, soit C''v l'intersection d'une sphère quelconque par le plan passant suivant les axes A et A'.

Le cercle d'intersection de la surface sphérique avec la surface de révolution C a pour projection C'''v, C''h.

Le cercle d'intersection de la surface sphérique avec la surface de révolution C' a pour projection verticale Civ,v; le point de rencontre m'^v des projections verticales des deux cercles est la trace verticale de la droite d'intersection des plans de ces cercles; ces plans étant perpendiculaires au plan vertical de projection, cette intersection a pour projection horizontale la perpendiculaire D^h abaissée de m'^v sur la ligne de terre. Les deux points m'^h m''^h sont les projections horizontales des deux points de rencontre des cercles C''' et C'v, et par conséquent de deux points de la courbe cherchée.

3° Quand les deux axes ne se rencontrent pas, il faut couper tout le système par des plans, parallèles au plan horizontal, qui coupent l'une des surfaces de révolution suivant des cercles, et l'autre suivant des courbes que l'on détermine pour chaque plan de la manière suivante :

On prend un plan auxiliaire vertical parallèle à l'axe de la surface de révolution inclinée. On projette la courbe génératrice sur ce plan, et alors :

Soient A, A^v, A'^h A'^v (*fig.* 28) les axes de deux surfaces de révolution, dont l'une est perpendiculaire au plan horizontal de projection. On mène par un point a quelconque de la ligne de terre une parallèle L' T' à A'^h, et on la considère comme la ligne de terre d'un nouveau plan vertical de projection. L'axe A' a pour trace horizontale a et pour trace verticale b dans le premier plan vertical de projection; il forme donc un triangle rectangle $a\,b^h\,b$ dont la projection dans le nouveau plan vertical est, en vraie grandeur, $a'^v\,b'^v\,c$ ayant pour hypothénuse A''^v, projection verticale de l'axe A' dans ce plan.

Soient C'^v la projection verticale de la courbe génératrice de la surface dans le plan vertical L' T'; V et V' les traces verticales d'un plan horizontal quelconque sur chacun des deux

plans verticaux de projection. Ce plan coupera la première surface de révolution suivant un cercle, et la seconde suivant une courbe que nous allons déterminer.

Pour cela nous menons plusieurs plans tels que V'' perpendiculaires à A''^v coupant la surface C' suivant des cercles, et le plan V' suivant une droite dont les projection et trace verticales sont en m''^v.

Cette droite a pour projection horizontale D^h et rencontre la surface C' en deux points m, m' situés chacun à une distance horizontale de l'axe égale au rayon R de la circonférence d'intersection du plan V'' avec la surface. Les projections horizontales de ces deux points sont m^h m'^h, et leurs projections verticales dans le plan vertical primitif de projection, m^v m'^v.

Déterminant ainsi un nombre suffisant de points tels que m et m', on a les projections de la courbe d'intersection du plan V avec la surface C', d'où les deux points d'intersection de cette courbe avec la circonférence d'intersection du plan V avec la surface C.

On voit par là que pour chaque deux points de la courbe demandée, il faut déterminer une courbe d'intersection d'une surface de révolution quelconque par un plan, ce qui rend très-longue la solution de ce problème.

Septième problème.

Trouver les projections de l'intersection d'une surface développable ou d'une surface de révolution et d'une surface gauche.

La solution générale de ce problème consiste, comme les précédentes, à couper tout le système par une série de plans horizontaux et à chercher les points de rencontre des courbes faites sur les deux surfaces par chacune de ces intersections.

Si la surface gauche est de révolution comme l'hyperboloïde de révolution, on choisit le plan horizontal de projection perpendiculaire à cet axe, et alors toutes les intersections par des dlans horizontaux sont des cercles.

Une autre méthode consiste à mener des plans par les deux génératrices, de systèmes différents sur la surface gauche, et à chercher l'intersection de ces plans avec l'autre surface donnée.

En général tous les problèmes sur les intersections de surfaces entre elles se ramènent à des intersections de ces surfaces par des plans.

LIVRE III.

OMBRES ET PERSPECTIVE.

On distingue, dans la nature, trois espèces de corps, en ce qui concerne la lumière, savoir :

1° Les corps lumineux ;

2° Les corps transparents ;

3° Les corps opaques.

Les corps lumineux engendrent la lumière.

Les corps transparents la reçoivent et se laissent pénétrer par elle.

Les corps opaques reçoivent la lumière et l'absorbent ou la réfléchissent.

La lumière se transmet en ligne droite.

On appelle *ombre* la portion d'un corps qui ne reçoit pas les rayons de lumière lancés par un corps lumineux.

Il y a deux espèces d'ombres :

1° L'ombre d'un corps sur lui-même ;

2° L'ombre portée par ce corps sur un autre corps.

Il n'y a d'ombres produites que lorsqu'il y a réception de la lumière par des corps opaques.

Lorsque le corps lumineux est un point, il peut se trouver à une distance, du corps éclairé, finie ou infinie.

Lorsque le point lumineux est à une distance finie du corps éclairé, les rayons lumineux tangents à la surface de ce corps, quel qu'il soit, constituent les génératrices d'un cône dont le point lumineux est le sommet.

Lorsque le point lumineux est à une distance infinie du corps éclairé, les rayons tangents constituent les génératrices d'un cylindre.

De là quatre problèmes principaux pour la recherche des ombres :

1° *Trouver la courbe de contact, avec un corps donné, d'un cône tangent à ce corps et ayant pour sommet un point donné.*

2° *Trouver l'intersection, avec un corps donné, d'un cône ayant pour sommet un point donné et pour courbe directrice la courbe de contact de ce cône avec un corps donné.*

3° *Trouver la courbe de contact, avec un corps donné, d'un cy-*

lindre tangent à ce corps et ayant les génératrices parallèles à une droite donnée.

4° *Trouver l'intersection, avec un corps donné, d'un cylindre ayant ses génératrices parallèles à une droite donnée, et, pour courbe directrice, la courbe de contact de ce cylindre avec un corps donné.*

Ces quatre problèmes sont des applications simples de la géometrie descriptive, tant que l'on considère les projections des points comme les pieds des perpendiculaires abaissées de ces points sur les plans de projection.

Mais si on représente les objets sur les plans de projection par les intersections, avec ces plans, de tous les rayons visuels partant d'un même point qui serait l'œil de l'observateur, alors la question est plus compliquée, bien que ne sortant pas des applications que l'on peut faire de la géométrie descriptive.

On donne le nom de *perspective* à l'opération qui a pour but de représenter les corps sur le plan vertical de projection, par les intersections, avec ce plan, de tous les rayons visuels passant par les divers points de ce corps, l'œil étant donné en projections ordinaires.

Avant d'étudier les projections des ombres des corps, soit que ces derniers soient représentés par leurs projections ordinaires, soit qu'ils le soient en perspective, nous croyons utile de donner les notions nécessaires pour représenter les corps de cette dernière manière.

ARTICLE Ier.

PERSPECTIVE.

Soient o^v o^h (*Pl.* I, *fig.* 29) les projections de l'œil de l'observateur. Du point a, de rencontre de o^v o^h avec la ligne de terre L T, comme centre, avec $a\,o^h$ pour rayon, on décrit une demi-circonférence qui rencontre L T en b; du point b on élève une perpendiculaire, et par le point o^v on mène une parallèle à la ligne de terre; ces deux droites se rencontrent au point d. $o^v\,d$ est la distance de l'œil au point o^v, c'est-à-dire au plan vertical. Si on fait la même opération de l'autre côté du point o^v, on obtient le point d'. Les trois points o^v, d, d' sont les seuls dont on se serve en perspective, et pour cette raison on les nomme:

o^v *point de vue*;

d, d', points de distance $\begin{cases}\text{de droite.}\\ \text{de gauche.}\end{cases}$



Toutes les questions relatives à la perspective se résolvent au moyen des deux problèmes suivants :

1° *Trouver la perspective d'une droite perpendiculaire au plan vertical.*

2° *Trouver la perspective d'une droite parallèle au plan horizontal et faisant un angle de 45° avec le plan vertical.*

Il suit de là que pour trouver la perspective d'un point, il suffit de faire passer par ce point deux droites, l'une dans la condition du premier problème, l'autre dans la condition du second. Or, quand on a le moyen de trouver la perspective d'un point, on a aussi le moyen de trouver celle d'un corps quelconque.

Premier problème.

Trouver la perspective d'une droite perpendiculaire au plan vertical.

Soient D^v D^h (*fig.* 29) les projections d'une droite perpendiculaire au plan vertical de projection.

La perspective de cette droite est l'intersection du plan vertical de projection avec le plan conduit suivant cette droite et l'œil, car tous les rayons visuels menés de l'œil à cette droite sont situés dans ce plan.

Pour trouver cette intersection ou trace verticale, nous menons par le point o, situé dans l'espace, une parallèle à la droite D ; ces deux parallèles ont leurs traces verticales l'une en D^v, l'autre en o^v ; la trace verticale du plan passant suivant ces deux droites n'est donc autre que la droite qui joint les deux points D^v et o^v.

D'où : *Pour trouver la perspective d'une droite perpendiculaire au plan vertical de projection, il suffit de joindre la trace verticale de cette droite au point de vue.*

Deuxième problème.

Trouver la perspective d'une droite parallèle au plan horizontal et faisant un angle de 45° avec le plan vertical.

Soient D'^v D'^h (*fig.* 29) les projections d'une droite satisfaisant aux conditions de l'énoncé, sa perspective est l'intersection, avec le plan vertical, du plan passant par le point o et cette droite. Pour trouver cette intersection ou trace verticale, il suffit de mener par le point o une parallèle à cette droite, laquelle parallèle a sa trace verticale en d. Or, la droite donnée a sa trace verticale en b, donc la ligne bd est la droite demandée.

D'où : *Pour trouver la perspective d'une droite à 45° avec le plan vertical et parallèle au plan horizontal, il suffit de joindre la trace verticale de cette droite avec le point de distance.*

De là, étant données les projections m^v m^h d'un point (*fig.* 30), on obtient la perspective de ce point :

1° En joignant m^v au point de vue *o;*

2° En menant par m^h une droite à 45° avec la ligne de terre, et par le point m^v une horizontale, ce qui donne la trace verticale *b* que l'on joint au point *d*. Le point *m* étant situé à la fois sur les deux droites, a sa perspective sur les perspectives de ces deux droites et par conséquent à l'intersection *m* des perspectives de ces droites.

(*Voir*, comme application de ces principes, la figure 31, Planche I.)

ARTICLE II.

PROBLÈMES SUR LES OMBRES.

Dans tous ces problèmes, nous supposerons le point lumineux situé à une distance infinie, cas analogue à l'éclairage par la lumière solaire; dans ce cas, l'ombre portée est l'intersection d'un cylindre avec un corps donné.

§ 1er. — PROJECTIONS DES OMBRES.

Premier problème.

Trouver les projections de l'ombre d'un cylindre surmonté d'un chapeau quarré.

Soient R^v R^h (*fig.* 32) les projections d'une droite parallèle aux rayons lumineux; C^h le cercle base d'un cylindre perpendiculaire au plan horizontal et surmonté d'un chapeau ayant *a b c d* pour projection horizontale.

La projection horizontale de l'ombre du cylindre est comprise entre les deux tangentes *t t'* au cercle C^h, parallèles à R^h, ces tangentes étant les traces des plans menés tangentiellement au cylindre parallèlement à R. En D^h et D'^h sont les traces des génératrices de contact; D^v est la projection verticale de D^h, donc tout le rectangle à gauche est dans l'ombre.

L'arête du chapeau projetée horizontalement en *b c* et verticalement en *h* a son ombre portée sur les plans de projection en *b' c' h'*. L'arête projetée horizontalement en *d c* et verticalement en *g h* a pour ombre portée *g' h'*, et ainsi de suite. Pour avoir l'ombre portée par l'arête *a b*, *e f* sur le cylindre, soit m^v m^h un point de cette arête; on mène par ce point une parallèle au

rayon lumineux; la projection horizontale de cette parallèle rencontre C^h en m'^h que l'on projette en m'^v sur la parallèle menée par m^v à R^v. En déterminant un certain nombre de points tels que m'^v, on finit par obtenir la courbe C' qui est la limite inférieure de l'ombre du chapeau sur le cylindre.

Deuxième problème.

Trouver les projections de l'ombre d'une sphère.

Soient $C^v C^h$ (*Pl.* II, *fig.* 1re) les projections d'une sphère; $R^v R^h$ celles d'une droite parallèle aux rayons lumineux.

Le cylindre tangent à la sphère et parallèle aux rayons lumineux a pour contact, avec cette dernière, un cercle dont les projections sont deux ellipses qu'il faut déterminer.

A cet effet, soit L' T' une ligne menée dans le plan horizontal parallèle à R^h, et supposons un plan vertical conduit suivant cette droite, ce plan est parallèle à R. Déterminons la projection verticale R'^v de R sur ce plan, ce qui se fait facilement en remarquant que deux points $m\ m'$ de R ont leur projection verticale sur le nouveau plan en $m^v\ m'^v$. Déterminons de même la projection verticale C'^v de la sphère sur ce plan.

Le cylindre tangent, parallèle aux rayons lumineux, est parallèle au nouveau plan vertical de projection; le cercle de contact est donc situé dans un plan perpendiculaire passant par le centre, et a pour projection verticale C''^v. Le demi-cercle au-dessus de C''^v est clair, et le demi-cercle au-dessous est obscur.

Pour projeter C'' horizontalement, il suffit d'abaisser des perpendiculaires sur la ligne de terre des différents points de C''^v, puis de mener par ces mêmes points des horizontales qui ne sont autres que les projections verticales des circonférences d'intersection de la sphère par des plans horizontaux. Les intersections des projections horizontales de ces circonférences avec les perpendiculaires abaissées des mêmes points de C''^v donnent des points de la projection horizontale de C'', et en les joignant tous, on obtient C''^h et la portion d'ombre apparente dans le plan horizontal.

Connaissant C''^h, on obtient C''^v dans le premier plan vertical en abaissant de tous les points qui ont servi à déterminer C''^h, des perpendiculaires sur la ligne de terre LT, et en prolongeant ces dernières de quantités égales aux hauteurs données par C''^v dans le second plan vertical à chacun des points de la courbe.

Ainsi $m_1{}^v$ dans le deuxième plan vertical sur C''^v donne, dans

le plan horizontal, m^h, lequel donne m^v dans le premier plan vertical, à une hauteur $m^v p$ au-dessus de la ligne de terre égale à $m_1^v p_1$. On obtient ainsi la portion d'ombre visible sur le plan vertical.

Pour avoir l'ombre portée, il suffit de déterminer les traces horizontales des génératrices du cylindre tangent ayant pour directrice la courbe $C''^v C''^h$ et ses génératrices parallèles à $R^v R^h$.

Il existe une infinité de problèmes sur les ombres. Tous ces problèmes sont des applications, plus ou moins difficiles, de la géométrie descriptive; il nous est impossible d'entrer ici dans tous les détails de ces applications, pour lesquelles nous renvoyons aux traités spéciaux de cette science. Les figures 33 et 34 (*Pl.* 1) représentent, l'une, l'ombre portée par deux cylindres égaux se coupant à angle droit; l'autre, l'ombre portée dans la niche.

§ 2. — PERSPECTIVE DES OMBRES.

Pour trouver la perspective des ombres, il faut avoir fait préalablement l'épure des projections des ombres. Alors la recherche de la perspective des ombres se fait absolument de la même manière que celle de la perspective d'un objet quelconque dont on connaît les projections.

Les mêmes motifs qui nous ont empêché de pousser plus loin les exemples de projections d'ombre, nous imposent la nécessité de passer outre sur ce sujet, dont l'utilité n'est pas de premier ordre pour le but que nous nous proposons de remplir.

LIVRE IV.

COUPE DES PIERRES.

Dans la construction, en général, on distingue deux genres de pierres :

Les moellons ;

Les pierres de taille.

Les moellons, quelle que soit leur composition, sont des pierres, le plus souvent brutes, quelquefois *parmentées*, c'est-à-dire taillées assez pour offrir une face rectangulaire d'une hauteur déterminée, que l'on emploie soit à la construction des *murs* ou massifs, soit à la construction des *voûtes* en les reliant entre elles par un *ciment*.

Les pierres de taille sont des pierres d'un volume généralement de beaucoup supérieur à celui des moellons, taillées sur toutes les faces, excepté quelquefois sur celles qui sont noyées dans de la maçonnerie de moellons, et affectant une forme dépendant de la surface extérieure de la construction dont elles font partie.

Lorsque les pierres de taille sont destinées à figurer dans des faces planes verticales ou inclinées, comme dans les murs et massifs, leurs formes ne sortent pas du parallélipipède rectangle ou oblique. Elles se placent les unes à côté des autres en *assises* horizontales superposées, ce qui nécessite que toutes les pierres d'une même assise aient même hauteur ; afin de donner du lien à la maçonnerie, on a soin de faire tomber les *joints* verticaux de deux pierres contiguës au-dessus du *plein* de la pierre placée immédiatement au-dessous.

Lorsque les pierres de taille sont destinées à figurer dans des surfaces courbes, développables ou gauches, comme dans les *voûtes*, alors elles affectent toute espèce de formes qui ne peuvent être déterminées *à priori* qu'au moyen d'une épure.

Le but de la coupe des pierres est en conséquence de *trouver les formes que l'on doit donner aux pierres de taille employées à la construction des voûtes*.

Les pierres ainsi transformées portent le nom de *voussoirs*.

On distingue deux espèces de voûtes, savoir :

1° Les voûtes simples ;

2° Les voûtes composées.

Les voûtes simples peuvent affecter les quatre genres de surfaces suivants, savoir :

1° Surface cylindrique;
2° Surface conique;
3° Surface sphérique;
4° Surface gauche.

Les voûtes composées, ou intersections de voûtes simples entre elles, peuvent être à *pénétration*, à *arêtes* ou à *arcs*.

Les voûtes composées sont dites à *pénétration*, lorsqu'elles sont la rencontre de deux voûtes simples ayant des *montées* différentes.

Les voûtes composées sont dites à *arêtes*, lorsque, ayant même *montée*, elles servent à établir la communication entre deux voûtes simples appartenant à deux pièces différentes.

Les voûtes composées sont dites à *arcs*, lorsque, ayant même *montée*, elles servent à fermer la partie supérieure d'une seule et même pièce.

ARTICLE Ier.

VOUTES SIMPLES.

On distingue cinq espèces de voûtes simples :

1° Les portes;
2° Les galeries;
3° Les descentes,
4° Les trompes;
5° Les escaliers.

§ 1er. — PORTES.

On nomme portes, en général, des ouvertures pratiquées dans les murs pour établir la communication entre deux pièces contiguës.

En coupe des pierres, la porte est seulement la voûte formant la surface supérieure du passage.

Soit ACDBE (*Pl.* II, *fig.* 2) une ouverture dans un mur, dont la section inférieure est le rectangle ABCD, et la section supérieure la demi-circonférence AEB.

Si on suppose le passage engendré par une droite se mouvant parallèlement à elle-même sur la directrice ACDBE, le volume intérieur de la porte se composera d'un prisme ABCD, A'B'C'D', et d'un demi-cylindre AEB, A'E'B', le tout étant vu en perspective.

On nomme :

Ligne plan de naissance, la ligne AB de laquelle partent les deux points A et B de naissance de la courbe AEB;

Axe de passage, l'axe oo' du cylindre, lequel est la ligne suivie par la personne qui passe;

Parement, les faces extérieures de la porte;

Parement intérieur, la surface intérieure;

Parement extérieur, les surfaces antérieure et postérieure du mur;

Pieds droits, les deux rectangles AA' CC', BB' DD'.

Les passages dans les murs sont de deux espèces, savoir :

Les passages *droits;*

Les passages *obliques*.

La voûte qui surmonte un passage peut avoir pour directrice une courbe quelconque, pourvu que cette dernière soit tangente en A et B à AC et à BD.

VOUSSOIRS.

Soit proposé de recouvrir le passage *droit* AB (*fig.* 3) en pierres de taille offrant à leur partie intérieure un demi-cercle.

Pour cela, on divise la demi-circonférence ACB en un nombre *impair* de parties égales, et on mène, aux différents points de division, des rayons que l'on prolonge jusqu'à la rencontre d'une seconde courbe A'C'B'.

On nomme : *Courbe d'intrados*, la courbe ACB intérieure;
Courbe d'extrados, la courbe A'C'B' extérieure.

Les portions des rayons menés à tous les points de division de ACB, compris entre les deux courbes, sont les traces verticales des *plans de joint* des voussoirs entre eux.

Pour relier les voussoirs à la maçonnerie du mur, par tous les points de rencontre des rayons avec la courbe d'extrados, on mène des horizontales et des verticales, qui représentent les traces verticales des plans de joint verticaux et horizontaux des voussoirs avec la maçonnerie du mur.

On nomme : *douelle* la face intérieure ab d'un voussoir; douelle *plate*, la surface plane engendrée par une génératrice se mouvant sur la corde ab, comme directrice; *douelle creuse*, la surface cylindrique engendrée par une génératrice se mouvant sur l'arc ab comme directrice;

Panneaux de tête, les faces β, δ, γ, α, etc., des voussoirs;

Clé, le voussoir α situé au milieu de la voûte et se plaçant en dernier pour la fermer;

Contre-clés, les voussoirs $\gamma\gamma'$;

Voussoirs de coussinet, les premiers voussoirs $\beta\beta'$ en contact avec le plan des naissances;

Voussoirs de conjoint, les voussoirs δ δ accolés aux voussoirs de coussinet ;

Reins, les voussoirs compris entre δ et γ, quel qu'en soit le nombre.

Diviser une voûte en voussoirs, se nomme *appareiller.*

On distingue trois parties dans une voûte : les coussinets, les reins et la clé.

C'est aux reins que les voûtes se brisent toujours.

On appelle *crossette* le prisme *a b c d* (*fig.* 4) que l'on ajoute aux voussoirs pour leur donner plus d'assise sur le voussoir inférieur. Lorsque les voûtes sont destinées à supporter de fortes charges, on ne met pas de crossettes, parce que les dernières font casser les voussoirs au point *b* s'il y a le moindre tassement.

En examinant la *figure* 3, on remarque que les hauteurs des verticales servant à opérer la liaison des voussoirs avec les pierres du mur, vont en décroissant depuis le voussoir inférieur jusqu'à la clé.

Lorsque le mur dans lequel la porte se construit est en pierres de taille, dont les assises sont d'égale épaisseur, si l'on veut que les voussoirs de la porte viennent se relier chacun avec une assise, on ne se donne plus de courbe d'extrados, et on prolonge les rayons, menés aux points de division de la courbe d'intrados, jusqu'à la rencontre des lignes horizontales des assises, comme dans la *figure* 5. Dans ce cas, la courbe d'extrados est la courbe qui joint tous les points de rencontre des rayons avec les lignes des assises.

Pour construire les voussoirs, on dessine leurs faces sur des planches que l'on découpe ensuite. Lorsque les angles des panneaux de tête avec la douelle sont aigus ou obtus, on les mesure avec un équerre mobile appelé *beuveau.*

Pour construire un voussoir, on commence par prendre une pierre dite *parallélipipède capable* de ce voussoir.

Cette pierre est, comme son nom l'indique, un parallélipipède dont les dimensions sont celles des projections du voussoir, lorsqu'il n'y a pas trop de perte ni trop de main-d'œuvre ; dans le cas contraire, c'est le plus petit parallélipipède dans lequel ce dernier peut tenir.

Les passages dans les murs étant droits ou obliques, on peut avoir à résoudre les quatre problèmes suivants :

Premier problème.

Porte *droite* dans un mur droit. (*Voir* Epure, *fig.* 3 et 5.)
Porte *droite* dans un mur en talus. (*Voir* Epure, *fig.* 7.)



Porte *droite* dans un mur cylindrique à l'intérieur, et conique à l'extérieur. (*Voir* Epure, *fig*.8 et 9.)

Porte *biaise* dans un mur droit, dite *biais passé*. (*Voir* Epure, dite *corne de vaehe*, *fig*. 6.)

Les trois premières épures ne présentent rien que de très-facile à comprendre, et s'appareillent comme la porte droite dans un mur droit. Il n'en est pas de même de la quatrième, où l'appareil est tout différent pour les motifs suivants :

L'axe de passage, dans ce cas, est une ligne parallèle aux pieds droits de la porte. Si on prenait pour directrice de la surface le cercle perpendiculaire, et pour génératrice une droite parallèle à cet axe, toute la poussée de la voûte s'exercerait suivant la perpendiculaire à cette ligne, c'est-à-dire, sur des points non soutenus, et tendrait par conséquent à faire tomber le mur.

Pour éviter cela, on mène une ligne AB perpendiculaire à la surface du mur et passant par le milieu O des points extrêmes GG' de la voûte, et sur ce point, comme centre, on appareille en prenant pour rayon de la courbe d'extrados une quantité OH plus grande que OG. Par ce moyen la voûte se trouve en quelque sorte creusée dans une masse en pierres de taille.

Pour simplifier la génération de cette dernière, dont les intersections avec les plans de joint des voussoirs seraient assez longues à déterminer, si on la prenait exactement cylindrique on la suppose une surface gauche engendrée par une droite se mouvant à la fois sur les deux circonférences extrêmes C et C et sur l'axe AB des voussoirs. Il résulte de là que les traces verticales des plans de joint des voussoirs sont précisément les projections verticales de génératrices de la surface intérieure de la voûte, d'où résulte qu'il est très-facile de déterminer immédiatement par le rabattement les faces de contact des voussoirs entre eux, lesquelles sont indispensables pour la taille.

Arrière-voussure de Marseille.

On donne ce nom à la voûte qu'il devient nécessaire de construire lorsque la porte proprement dite qui sert à fermer la communication entre les deux pièces séparées par le mur, se trouve placée dans l'épaisseur de ce dernier.

Soient AB (*fig.* 13) la projection horizontale de l'ouverture de passage ; CD la largeur d'un évidement fait dans l'intérieur du mur autour de l'ouverture, pour recevoir une porte à deux battants.

Soit C la courbe d'intrados; C', projection verticale de CD, est ce qu'on nomme le *cercle de feuillure*.

E C, F D sont les traces horizontales de deux plans dits *plans d'ébrasement* ou *embrasures* de la porte.

Les intersections des plans d'ébrasement avec la face antérieure du mur EF ont pour projections verticales E'P et F'Q.

Lorsque la porte s'ouvre, chacun de ses battants, terminé supérieurement par un demi C', décrit une surface annulaire. Au lieu de creuser cette surface annulaire dans le mur, on creuse une surface gauche plus élevée, ce qui permet d'avoir des lignes droites pour *arêtes* de *joints*.

Remarquant que le point le plus haut de la porte est le point G, si par ce point nous menons une horizontale, les points E' et F' seront les points les plus élevés nécessaires aux plans d'ébrasement. Joignant les deux points par un arc de cercle C'', dont on tâche d'avoir le centre aussi près que possible du point *o*, pour motifs que nous donnerons plus loin, on considère la surface comprise entre C' et C'' comme engendrée par une droite se mouvant à la fois sur C' C'' et l'axe de passage *o x*.

Reste à déterminer les intersections de cette surface avec les plans d'ébrasement.

Alors on remarque que l'arc de cercle C'' ne permet de déterminer la surface que jusqu'à la génératrice *o* F', et que pour avoir des génératrices entre *o*F' et *o* Q, il faut prolonger cet arc de cercle.

Mais en continuant à engendrer la surface de cette manière, il peut arriver que la partie supérieure de la porte ouverte et accolée au plan d'ebrasement, se trouve plus élevée que l'intersection de ce plan avec la surface gauche, et ne puisse par conséquent s'ouvrir entièrement.

Pour éviter cet inconvénient, au lieu de continuer l'arc de cercle C'', on rabat sur le plan vertical le plan d'ébrasement en le faisant tourner autour du point D comme charnière, et on suppose la porte collée dessus. Dans ce cas la portion circulaire de la demi-porte se rabat en C'^{r}, et la droite QF' en Q^r F'^{r}.

Par le point F'^{r} on mène une tangente à C'^{r} et on suppose la courbe F'^{r} C'^{r} D^r comme l'intersection de la surface gauche avec le plan d'ébrasement. Il est évident, alors, que la porte pourra s'ouvrir entièrement et se coller sur le plan d'ébrasement. On ramène alors le tout dans la position nor-



male, et on obtient pour projection verticale de l'intersection de la surface gauche avec le plan d'ébrasement, une courbe telle que C'''. Alors, pour engendrer la portion de surface gauche comprise entre OE' et *o*P, on remplace la directrice C'' par la directrice C'''.

Pour appareiller, on se donne une courbe d'extrados C'^{v} d'un rayon plus grand que OE', et on divise en voussoirs comme à l'ordinaire.

On voit alors qu'il est plus avantageux d'avoir le centre de C'' en *o* que partout ailleurs, parce que les arêtes de joints des voussoirs sont alors normales à la courbe C''; mais cela ne peut pas toujours avoir lieu parce qu'on se donne une hauteur *maxima* pour ce point G.

§ 2. — VOUTES.

Les voûtes ne présentent rien de remarquable quant à l'appareillage ; cette opération s'y effectue absolument de la même manière que pour les portes. Les voussoirs se placent alors par assises comme dans les murs, joints contre pleins.

Les voûtes sont toutes cylindriques ; suivant la forme de la courbe directrice, on distingue trois espèces de voûtes :

Les *voûtes en plein cintre ;*

Les *voûtes surhaussées ;*

Les *voûtes surbaissées.*

Les voûtes en plein cintre ont pour directrice une demi-circonférence.

Les voûtes surhaussées ou surbaissées ont pour directrice une courbe quelconque, satisfaisant à la condition d'être tangente aux arêtes des pieds droits sur la ligne de naissance, et ayant son sommet plus haut, pour les premières, plus bas, pour les dernières, que le sommet de la courbe en plein cintre décrite sur le même diamètre.

Les voûtes surhaussées ont ordinairement pour directrice une ogive formée de deux arcs de cercle ou de deux paraboles.

Les voûtes surbaissées ont pour directrice tantôt un arc de cercle, tantôt une ellipse ou une courbe à plusieurs centres.

Parmi ces dernières, il en est une très-employée et qui porte le nom d'*anse de panier* ou *courbe à trois centres.*

Cette courbe est engendrée de la manière suivante :

Soient AB (*fig.* 10) l'ouverture, et CO la montée que la voût doit avoir, c'est-à-dire les deux axes de la courbe.

Sur
Du p
arc d
joint
Par l
rallèl
deux
En
donc
est é

L
son

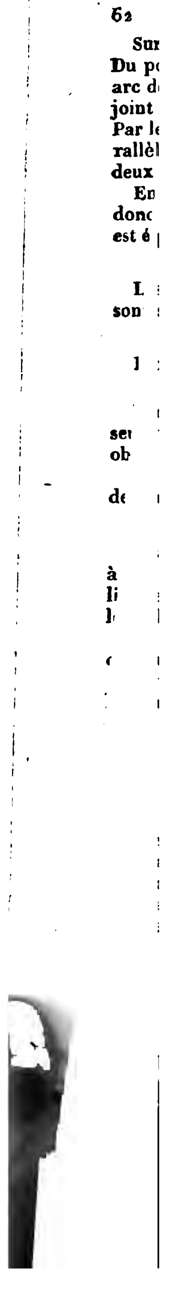
l

se
ob

de

à
li
l

(



1° *Trompe dans l'angle.*

Soit AB (*Pl.* III, *fig.* 1re) la face d'un mur dans lequel on a pratiqué un évidement ACB; on demande l'appareil de la voûte qui recouvrira cette surface.

La *figure* ACB étant triangulaire, la surface de la voûte sera conique; toutes les arêtes de joint des voussoirs viendront, par conséquent, aboutir au point C.

Pour appareiller, on partage l'angle ACB en deux parties égales, par la droite CD, et on abaisse du point B une perpendiculaire BE sur CD. Sur BE, comme diamètre, on décrit une demi-circonférence que l'on considère comme la directrice du cône dont C est le sommet, lorsqu'elle est ramenée dans le plan perpendiculaire à ACB.

On détermine alors l'intersection du cône avec la face AB du mur, et on obtient une courbe C sur laquelle on appareille, en prenant pour centre de la courbe d'extrados le point D.

Afin d'éviter que les voussoirs se terminent au point *c* par un angle aigu, on les coupe par un cône, normal au premier, situé à une distance arbitraire du point C. Alors, on remplit l'espace du côté du point C par une seule pierre à laquelle on donne le nom de *trompillon*.

2° *Trompe sur le coin.*

Soient AB, BC (*Pl.* III, *fig.* 2) les faces de deux murs se rencontrant suivant l'arête B. On fait un évidement quarré ABCD dans le coin, et on demande l'appareil de la voûte qui recouvrira cet évidement pour que le mur puisse se continuer au-dessus.

Ici, comme dans le cas précédent, la surface de la voûte sera conique.

Sur AC, comme diamètre, on décrit une demi-circonférence qui passe par le point B. On considère cette demi-circonférence comme directrice de la surface conique, lorsqu'elle est ramenée dans le plan perpendiculaire à BD. On détermine alors les intersections *c*, *c'* de la surface conique avec les deux faces de mur AB et BC, ce qui donne deux courbes d'extrados qui sont, dans le cas particulier du quarré, des paraboles sur lesquelles on appareille comme à l'ordinaire.

On détermine le trompillon comme dans le cas précédent.

3° *Trompe cylindrique.*

Soit AB (*Pl.* III, *fig.* 3) la face d'un mur; on propose de faire

supporter par ce mur une tour cylindrique, dont la base est à une certaine hauteur au-dessus du sol (*exemple*, église de Saint-Sulpice, rue Garancière).

Dans ce cas, la trompe est la surface d'intersection du cylindre vertical, par un cylindre horizontal parallèle à la surface du mur.

La demi-circonférence ACB est la projection horizontale de la courbe d'intersection des deux cylindres; déterminant la projection verticale c^v de cette intersection, il ne reste plus qu'à appareiller.

Pour cela, on développe la courbe d'intersection des deux cylindres et la droite en parties égales, que l'on projette ensuite sur les deux projections de cette courbe.

Pour avoir les plans de joint des voussoirs, on coupe par des plans conduits suivant l'horizontale CR perpendiculaire à AB, les points de division de la courbe d'intersection des deux cylindres.

On obtient le trompillon en coupant les voussoirs par un cylindre qui a pour axe la droite CR.

4° *Trompe sphérique* (niche).

Soit AB (*Pl.* III, *fig.* 4) la face d'un mur; on fait un évidement cylindrique, à base circulaire ACB; on propose de le recouvrir d'une voûte.

Cette épure, la plus simple de toutes celles relatives aux trompes, se trouve exécutée dans la figure.

§ 5. — ESCALIERS.

L'escalier est une surface hélicoïdale.

L'*hélicoïde*, dont nous n'avons pas parlé dans la géométrie descriptive, est une surface engendrée par une droite se mouvant sur une hélice et l'axe du cylindre de cette hélice, en conservant toujours la même inclinaison avec l'axe du cylindre.

Lorsque la droite génératrice de la surface se meut parallèlement à un plan perpendiculaire à l'axe de l'hélice, la surface est dite :

Hélicoïde gauche droit.

Lorsque la droite génératrice a une inclinaison quelconque avec l'axe du cylindre, la surface est dite :

Hélicoïde gauche oblique.

L'escalier est une surface hélicoïdale gauche droite.



Nous terminerons ce qui est relatif à la coupe des pierres en donnant le tableau suivant :

TABLEAU *des poids et résistances des différentes pierres, d'après M. Hachette.*

NOMS DES PIERRES.	POIDS de 1^{m} cube.	Résistance d'un cube de 5 centimètres de côté.
Grès blanc.	2475 kil.	23086 kil.
Cliquart de Meudon. . .	2439	11977
Liais de Bagneux. . . .	2439	11113
Banc franc de Montrouge. .	2354	6462
Roche d'Arcueil.. . . .	2303	6334
Roche dure de Châtillon. .	2294	4347
Pierre de Saint-Cloud. . .	2157	3339
Pierre de Saint-Leu. . .	1704	1382
Pierre ponce.	675	1053
Lave du Vésuve.. . . .	2642	15881
Porphyre.	2798	50021
Granit de Normandie . .	2662	17535
Marbre noir de Flandre. .	2721	19719
Marbre blanc.	1694	8176

LIVRE V.

THÉORIE DES ENGRENAGES.

DÉFINITIONS.

Les engrenages sont des appareils destinés à transmettre le mouvement circulaire continu d'un arbre à un autre arbre non monté sur le même axe.

On considère trois positions relatives de deux arbres; savoir :

1° *Arbres dont les axes sont parallèles ;*

2° *Arbres dont les axes concourent en un même point ;*

3° *Arbres dont les axes sont dirigés d'une manière quelconque dans l'espace.*

Dans le premier cas, les engrenages sont dits *cylindriques.*

Dans le second cas, les engrenages sont dits *coniques.*

Dans le troisième cas, les engrenages sont dits *dans l'espace.*

CHAPITRE PREMIER.

ENGRENAGES CYLINDRIQUES.

Soient AB, CD (*Pl.* IV, *fig.* 1re) les axes de deux arbres parallèles, dont les vitesses de rotation doivent être entre elles comme $m : n$.

Menons la perpendiculaire AC, commune aux deux parallèles, et divisons-la en deux parties AE, EC, pour lesquelles on a :

$$AE : EC :: n : m.$$

Des points A et C, comme centres, avec AE et EC pour rayons, décrivons des circonférences dans le plan passant par ces deux points, perpendiculairement à AB et à CD. Soient A', C' ces deux circonférences rabattues.

Par le point E menons une parallèle EF à AB, et considérons-la comme génératrice de deux cylindres engendrés autour de AB et de CD. Soient *a b c d*, *c d e f* deux portions de ces cylindres, comprises entre deux plans perpendiculaires *ae*, *bf*.

Si r et R sont les rayons, on a pour expression des circonférences :

Cylindre AB . . . . $2\pi r$
Cylindre CD . . . . $2\pi R$

et de : $r : R :: n : m$

on tire : $2\pi r : 2\pi R :: n : m$

et $m \times 2\pi r = n \times 2\pi R$

Ce qui indique que *m* tours de la petite circonférence sont égaux à *n* tours de la grande, et l'on a réellement pour les vitesses de rotation relatives :

$$v : v :: m : n$$

ce que l'on s'était proposé.

Si les cylindres ne font que tourner l'un sur l'autre, sans éprouver de résistance, les vitesses de rotation sont réellement dans le rapport déterminé ci-dessus; mais si l'un étant moteur, l'autre oppose la moindre résistance au mouvement, il y a glissement de l'un sur l'autre.

Les engrenages ont pour but de rendre la transmission du mouvement du cylindre moteur au cylindre résistant aussi régulière que s'ils étaient complètement libres, quelle que soit d'ailleurs la puissance qui s'oppose au mouvement du second.

A cet effet, on munit les deux cylindres de dents qui s'interposent les unes dans les autres.

C'est la détermination des formes de ces dents qui constitue la théorie des engrenages.

ARTICLE Ier.

ENGRENAGES A ÉPICYCLOÏDES.

Soient *o*, *o'* (*fig.* 2) les centres de deux circonférences tangentes au point A. Supposons que la circonférence *o* roule sur la circonférence *o'*, le point A de contact engendre la courbe ABCDEF, dite *épicycloïde*.

Si maintenant, au lieu de faire rouler la circonférence *o* sur la circonférence *o'*, on les fait tourner, tangentiellement l'une à l'autre, autour de leurs centres respectifs, il est évident que le point A occupe sur la courbe ABCDEF les diverses positions qu'il y occupait quand le cercle *o'* roulait sur l'autre. Si donc on munit la roue AB d'une saillie intérieure à la courbe, et le point A d'une pointe suffisamment forte, on peut transmettre le mouvement de la circonférence *o'* à la circonférence *o*, quelle que soit sa résistance, aussi uniformément que si elle n'en opposait aucune.

On nomme dents d'engrenages une série de saillies a', b', c', d', e' (*fig.* 3), munies chacune d'une portion d'épicycloïde, et venant successivement engrener avec les points a, b, c, etc., de la circonférence o, entre chacun desquels est un vide suffisant pour loger chaque dent de la roue o'. Ces dents sont assez rapprochées les unes des autres pour qu'il y en ait toujours au moins une qui engrène bien.

Mais, dans la figure 3, il n'y a possibilité de transmettre le mouvement de rotation de la roue o' à la roue o que dans un sens.

Comme, dans la plupart des cas, il faut pouvoir transmettre ce mouvement dans les deux sens, on est dans l'usage de munir chacune des dents de deux arcs d'épicycloïde (*fig.* 4), dont l'un agit sur le point situé d'un côté du vide, et l'autre sur le point situé de l'autre côté.

Non-seulement il faut pouvoir transmettre le mouvement de la roue o' à la roue o, mais encore il faut pouvoir transmettre celui de la roue o à la roue o'. A cet effet, on compose les dents d'engrenage de deux parties, savoir :

L'une extérieure, à épicycloïde (*fig.* 5), destinée à agir ; l'autre intérieure, à faces planes, destinée à recevoir l'action des dents de l'autre roue.

§ 1er. — DIMENSIONS DES DENTS D'ENGRENAGE.

Nous trouverons (*Résistance des matériaux*) que si on représente par :

b, l'épaisseur des dents,
l, la hauteur des dents,
a, la longueur des dents,

on a : $$b^2 = \frac{P}{100}$$

et $$l = 1.2\ b$$
$$a = 4.5\ b$$

P étant la pression exercée tangentiellement à la circonférence moyenne des dents.

Il résulte de là, que connaissant les diamètres des roues à faire engrener, et la charge à la circonférence de l'une d'elles, on a tout ce qu'il faut pour construire ces roues.

Exemple.

Soit proposé de *transmettre une force de* 50 *chevaux d'un arbre*

à un arbre parallèle dont l'axe est à une distance de 1^m25 *de celui du premier, les vitesses de rotation devant être entre elles comme 4 est à 7 (fig. 1), et l'arbre moteur faisant 9 tours par minute.*

Nous divisons la distance A C en deux parties proportionnelles à 7 et 4 de la manière suivante.

$$AE + EC : AE :: 4 + 7 : 4$$

d'où : $AE = \frac{4 \times AC}{11} = \frac{4 \times 1.25}{11} = 0.^m454$

Le petit diamètre est $2 \times 0.454 = 0.^m908$.

Le grand diamètre est $2\,(1.25 - 0.454) = 1.592$.

50 chevaux $= 50 \times 75 = 3750$ kilogrammètres par seconde.

Le chemin parcouru par un point de la circonférence moyenne de la grande roue par minute, est :

$$9 \times 3.1416 \times 1.^m592 = 45.^m00$$

et par seconde :

$$\frac{45.^m}{60} = 0.^m75$$

La pression exercée tangentiellement à la roue est donc :

$$\frac{3750}{0.75} = 5000 \text{ kilogr.}$$

On a alors : $b^2 = \frac{5000}{100} = 50$

et $b = \sqrt{50} = 7$ centimètres.

Ajoutant $^1/_8$ en sus pour l'usé, il vient, en nombre rond :

$b =$ 8 centimètres.
$l =$ 9.6 centimètres.
$a' =$ 36.0 centimètres.

§ 2. — NOMBRE DES DENTS.

La circonférence de la grande roue est $3{,}1416 \times 1.^m592 = 5.^m000$.

La circonférence de la petite roue est $3{,}1416 \times 0{,}908 = 2.^m856$.

L'épaisseur d'une dent étant 8 centimètres, l'épaisseur du vide doit être de 85 millimètres, alors le *pas* ou espace composé



d'un vide et d'un plein est 165 millimètres. Divisant, d'une part, 5 mètres, d'autre part, 2.^{m}856 par 165 millimètres, nous trouvons pour nombre des dents forcément entier :

1° Grande roue. . . . . 31 dents,
2° Petite roue. . . . . 18 dents.

Les nombres sont compris pour la première entre 30 et 31, et pour la seconde entre 17 et 18. Comme il y a avantage à augmenter le nombre des dents pour qu'elles engrènent plus longtemps chacune, nous avons pris 31 et 18, qui donnent d'ailleurs :

$$31 : 18 :: 7 : 4.06$$

rapport aussi rapproché que possible.

§ 3. — TRACÉ DES DENTS.

Sur une feuille de papier suffisamment grande, on tire une ligne (*fig.* 6) sur laquelle on prend une distance $o\,o' = 1.^{m}25$, ou une réduction de $1.^{m}25$ suivant que l'on dessine en grandeur naturelle, au 1/4, au 1/5 ou etc. On prend ensuite $o\,A = 0.^{m}454$, et de part et d'autre du point A, on prend $AB = AC = 1/2\ l = 4^{c.m.}80$.

Des points o et o', comme centres, avec oB, oA, oC, o'B, o'A, o'C pour rayons, on décrit des circonférences. On divise ensuite la circonférence moyenne oA en 31 parties égales, et la circonférence moyenne o'A en 18 parties égales. Cela fait, on partage chacune des divisions en deux autres parties qui sont entre elles comme 11 est à 12, la plus petite étant destinée à faire le plein de la dent, et l'autre le vide.

Pour tracer les courbes des dents, on fait à part une épure des portions d'épicycloïdes dont on a besoin, et on cherche les arcs de cercles qui s'en rapprochent le plus. Quand on a trouvé ces derniers, dont on prend le centre, autant que possible, sur les circonférences moyennes, on trace chaque dent sans la moindre difficulté, puis on mène des rayons à tous les points de division, ce qui donne l'épure de la figure 6.

ARTICLE II.

ENGRENAGES A DÉVELOPPANTES DE CERCLE.

Les engrenages à épicycloïdes, bien que les plus généralement employés à cause de leur facile exécution, présentent des inconvénients assez graves en théorie pour que l'on tâche de leur substituer les engrenages à développantes de cercle, dont le seul défaut est de présenter certaines difficultés dans l'exécution.

Pénétré de l'importance qu'il y aurait à pouvoir généraliser l'emploi des engrenages à développante, nous allons en donner une théorie aussi complète que possible.

On donne le nom de *développante* de cercle à la courbe décrite par un point A d'une circonférence (*fig.* 7) lorsqu'il s'éloigne de cette circonférence, en restant toujours situé sur une tangente dont la longueur entre le point de contact et le point mobile est égale à l'arc compris entre le point de départ et le point de contact.

Ainsi, si par les points A, B, C, etc., on mène des tangentes à la circonférence o, on a successivement :

$$A'B = \text{arc } AB$$
$$A''C = \text{arc } ABC$$
$$A'''D = \text{arc } ABCD$$
etc.

Cette courbe étant la développante du cercle, le cercle est sa développée, et toutes les tangentes au cercle lui sont normales.

Partant de ces principes, soient o, o' (*fig.* 8) les axes de deux arbres parallèles. Soient R et r les rayons de deux circonférences décrites de ces axes, comme centres, dans un plan perpendiculaire à leur direction. Les rapports entre les vitesses de rotation devant être $\frac{m}{n}$, supposons que l'on ait :

$$R : r :: n : m.$$

Soit AB une tangente commune à ces deux cercles, et m un point quelconque pris sur cette tangente. Décrivons les deux portions de développantes de cercle passant par ce point, nous obtenons les deux courbes Cm, Dm, qui ont même normale AB et par conséquent même tangente au point m.

Or, en quelque point de AB qu'on prenne le point m, la même relation aura lieu; nous en concluons que si les deux roues tournent en même temps, les développantes se touchant toujours, ces deux courbes seront constamment en contact l'une avec l'autre sur la droite AB.

Maintenant, au lieu d'une seule développante sur chaque cercle, on peut en mettre plusieurs. Pour cela il suffit de diviser la droite AB en un certain nombre de parties égales et de décrire les développantes des deux cercles passant par chacun des points de division. Pendant le mouvement de rota-



tion des deux cercles, ces développantes resteront toutes en contact deux à deux, car elles ont les mêmes normales, non-seulement sur la ligne AB, mais encore chaque série sur son cercle, et les distances mesurées sur ces normales sont constantes de part et d'autre.

Théoriquement, rien n'est plus facile que de concevoir, d'après ces données, le tracé des dents d'engrenage à développante.

Chaque dent se compose de deux courbes opposées servant indifféremment à transmettre ou à recevoir le mouvement.

Pratiquement, il n'en est plus ainsi, quant à la facilité de conception, comme nous allons le voir.

§ 1er. — DIMENSIONS DES DENTS D'ENGRENAGE.

La formule $b^2 = \frac{P}{100}$ nous donne une épaisseur dont nous déterminerons la place par les considérations suivantes :

En examinant les deux roues représentées dans la figure 8, on remarque que si on rapproche ou recule les axes *o* et *o'* l'un de l'autre, cela ne change rien à la forme des dents, ce qui n'a pas lieu pour l'épicycloïde. Ce sont toujours les deux mêmes développantes, la tangente seule change, le point de contact aussi ; il résulte de là ce premier fait, que les diamètres des roues en contact ne sont pas déterminés seulement parce que l'on connaît la distance des axes et le rapport entre leurs vitesses de rotation, et parce que l'on peut faire usage de plusieurs couples d'engrenages, pourvu que leurs rayons soient entre eux comme $n : m$.

La seule variation qui existe entre ces différents couples, c'est que, la distance entre les deux circonférences prises sur la ligne *oo'* devant être égale à la longueur des dents, plus les circonférences sont petites, plus les dents sont longues, et réciproquement.

Les dents longues présentent l'avantage de rester plus longtemps en contact ; mais alors elles sont plus épaisses à la base, et leur nombre diminue non-seulement en raison de cette épaisseur, mais encore en raison de la diminution du diamètre de la roue. Les dents courtes engrènent peu de temps, mais elles engrènent plus à la fois que les longues.

Conservant, pour le moment, le même rapport entre la longueur et l'épaisseur des dents que pour les roues à epicy-





cloïdes, la somme des rayons intérieurs des dents devient $R + r = oo' - 1.2\,b = K$, et les rayons extérieurs des dents sont :

$$R + 1.2\,b \text{ et } r + 1.2\,b$$

Il ne reste plus qu'à trouver la place de b. Au premier abord, il semble qu'elle est sur les circonférences décrites avec R et r pour rayons, car b est l'épaisseur *maxima ;* eh bien, encore ici, une nouvelle incertitude, car il peut arriver, en prenant b sur les circonférences, que les dents d'une des deux roues, et quelquefois des deux roues à la fois, se trouvent pointues (*fig.* 9) à leur extrémité, soit pour atteindre la longueur $l = 1.2\,b$, soit même avant qu'elles l'aient atteinte, si on ne veut pas que la dent s'égrène promptement, il faut alors remplacer b par b', ce qui, pour $ab = a'b'$, donne $cd < c'd'$.

Mais en augmentant cd, on augmente b et diminue le nombre des dents; or, comme c'est l'épaisseur seulement nécessaire en cd, il n'y a pas lieu à l'augmenter; il faut donc diminuer l et le faire égal à ab''. Mais alors on n'a plus

$$OO' = R + r + 1.2\,b$$

mais :

$$OO' = R + r + l$$

Mais l ne peut se déterminer qu'autant que l'on a R et r, car telle valeur de l qui convient pour un rayon, ne convient pas pour un autre, et alors les trois quantités R, r et l étant inconnues, il faut tâtonner pour les déterminer.

De plus, en diminuant l, on rend moins long le temps pendant lequel a lieu le contact des dents; il arrive alors qu'elles fatiguent beaucoup plus, et se détériorent promptement; on a donc avantage à faire l aussi grand que possible.

Dans ces incertitudes, il n'y a qu'un moyen de se tirer d'affaire, et c'est le suivant :

Nous remarquons tout d'abord que, pourvu que les roues aient le même pas, elles engrèneront toutes ensemble deux à deux, puisque leur denture dépend d'elles-mêmes, et non de la roue avec laquelle elles engrènent, avantage que ne présentent pas les épicycloïdes. De là résulte que, au lieu de nous embarrasser de deux roues devant être mues l'une par l'autre, nous n'avons plus qu'un seul problème à résoudre, savoir :

Etant donnés le diamètre d'une roue d'engrenage et l'épaisseur maxima b *de ses dents, construire cette roue.*

Pour résoudre ce problème, soit o (*fig.* 10) le centre de la roue donnée, et R son rayon.

Soient ab, ac, ad, ae, les épaisseurs diverses que peuvent avoir les dents, et soient :

$$ac = 2\ ab$$
$$ad = 3\ ab$$
$$ae = 4\ ab$$
etc.

Décrivons l'arc aq de développante, passant par le point a, et les divers arcs opposés pour former la dent, passant par les points b, c, d, e.

Nous obtenons ainsi pour intersection des arcs, les points m, n, p, q. Menons les rayons om, on, op, oq. Les longueurs mm', nn', pp', qq' sont les hauteurs des dents complètes. Faisons l'épure de ces dents, nous trouvons pour les divers rapports entre les hauteurs et les largeurs correspondantes, les nombres suivants :

1° Dent abm . . $mm' = 1.25\ ab = \frac{5}{4}\ ab$

2° Dent acn . . $nn' = 1.125\ ab = \frac{9}{8}\ ab$

3° Dent adp . . $pp' = 1.000\ ab = \frac{12}{12}\ ab$

4° Dent aeq . . $qq' = 0.950\ ab = \frac{15}{16}\ ab$

Il résulte de là, que plus l'épaisseur de la dent est considérable, plus sa longueur est petite, par rapport à cette épaisseur.

Admettant que, pour prendre aisément $l = 1.2\ b$, il faut que l'on ait :

$$l' = 1.5\ b$$

en appelant l' la hauteur du point de rencontre des deux arcs de développante, nous concluons des résultats ci-dessus :

Que, s'il est indispensable d'avoir $l' = 1.5\ b$, au moins, tous les diamètres de roues ne peuvent convenir à une épaisseur donnée b des dents.

On peut alors se proposer la solution du problème suivant :

Trouver le rapport qui doit exister entre le rayon R *d'une roue et l'épaisseur* b *d'une dent, pour que la hauteur* l' *du point de*

rencontre des deux arcs de développantes soit égale à 1.5 b.

Ce rapport trouvé, on déterminera, pour tous les diamètres de roues, l'épaisseur *maxima* que peuvent avoir leurs dents, et alors on combinera les distances des arcs, ou leurs vitesses, de manière à pouvoir employer des roues dont les dents aient des épaisseurs en rapport avec les résistances à vaincre.

Malheureusement ce problème n'est pas soluble, comme il est facile de s'en convaincre en cherchant à le résoudre. Du reste, la marche à suivre dans cette circonstance est simple, et nous allons la donner :

Soit ABB'B'', etc. (*fig.* 12) une portion de polygone régulier ; prolongeons les côtés AB, BB', B'B'', etc., et décrivons les différents arcs de cercle successifs des points B, B', B'', etc., comme centres.

Le polygone étant régulier, tous les angles ABA', A'B'A'', A''B''A''', etc., sont égaux entre eux; il en résulte que les arcs AA', A'A'', etc., sont entre eux comme les rayons AB, A'B', A''B'', etc., et on a :

$$AA' : A'A'' : A''A''' : \text{etc.} :: AB : A'B' : A''B'' : \text{etc.}$$

d'où on tire :

$$AA' + A'A'' + A''A''' + \text{etc.} : AA' :: AB + A'B' + A''B'' + \text{etc.} : AB$$

c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} \text{Arc} : AC : AA' &:: AB + AB' + AB'' + \text{etc.} : AB \\ &:: AB + 2AB + 3AB + \text{etc.} : AB \\ &:: AB(1 + 2 + 3 + 4 + \text{etc.}) : AB \\ &:: 1 + 2 + 3 + 4 + \text{etc.} : 1 \end{aligned}$$

Soit AB infiniment petit, et n le nombre de fois qu'il est contenu dans AD, on a :

$$AB = \frac{AD}{n}$$

et arc $AC : AA' :: 1 + 2 + 3 + \text{etc.} + n : 1$

Mais la somme des termes $1 + 2 + 3 + \text{etc.} + n$ est

$$S = \frac{n(n+1)}{2}$$

donc : $\text{Arc } AC : AA' :: \frac{n(n+1)}{2} : 1$

Quand u est très-petit, l'arc est aussi très-petit ; alor étant constant, il faut, pour qu'il puisse entrer dans la de arc (tang. $= u$), qu'il soit aussi petit que possible à-dire :

$$K \pi = 0$$

on a alors pour tous les arcs quelconques :

$$\text{Arc}(\text{tang.} = u) = u - \frac{u^3}{3} + \frac{u^5}{5} - \frac{u^7}{7} + \frac{u^9}{9} - \text{etc}$$

Appliquant cette formule à la figure 11, nous avon

$$DE = \text{arc}(\text{tang.} = u)$$
$$DC = \text{tang. } DE = u$$

et alors il vient :

$$\text{Arc } DE = DC - \frac{\overline{DC}^3}{3} + \frac{\overline{DC}^5}{5} - \frac{\overline{DC}^7}{7} + \frac{\overline{DC}^9}{9} - $$

Remarquant que $AE = AD - DE$
$= DC - DE$

il vient, en remplaçant DE par sa valeur :

$$AE = + \frac{\overline{DC}^3}{3} - \frac{\overline{DC}^5}{5} + \frac{\overline{DC}^7}{7} - \frac{\overline{DC}^9}{9} + \text{e}$$

or, on a : $\overline{DC}^2 = (2R + l')\,l'$

Remplaçant DC par sa valeur en fonction de R vient :

$$AE = + \frac{1}{3}\left(\sqrt{(2R + l')\,l'}\right)^3 -$$
$$\left(\sqrt{(2R + l')\,l'}\right)^5 + \frac{1}{7}\left(\sqrt{(2R + l')\,l'}\right)$$

Faisant dans cette équation :

$$AE = \frac{b}{2}$$
$$l' = 1.5\,b$$

[redacted]

il vient :

$$b = +\frac{2}{3}\left(\sqrt{(2\,\mathrm{R} + 1.5\,b)\,1.5\,b}\right)^3 - \frac{2}{5}$$

$$\left(\sqrt{(2\,\mathrm{R}+1.5\,b)\,1.5\,b}\right)^5 + \frac{2}{7}\left(\sqrt{(2\,\mathrm{R}+1.5\,b)\,1.5\,b}\right)^7 -$$

etc.

Prenant le premier terme seulement, sauf à y avoir égard plus tard :

$$\sqrt[3]{b} = \sqrt[3]{\frac{2}{3}}\ \sqrt{3\,b\,\mathrm{R} + 2.25\,b^2}$$

Elevant tout à la sixième puissance, il vient :

$$b^2 = \frac{4}{9}\ (3\,b\,\mathrm{R} + 2.25\,b^2)^3$$

$$= \frac{4}{9}\left(27\,b^3\,\mathrm{R}^3 + 60.7\,b^4\,\mathrm{R}^2 + 45.7\,b^5\,\mathrm{R} + 11.4\,b^6\right)$$

Divisant tout par b^2 :

$$1 = \frac{4}{9}\left(27\,b\,\mathrm{R}^3 + 60.7\,b^2\,\mathrm{R}^2 + 45.7\,b^3\,\mathrm{R} + 11.4\,b^4\right)$$

Effectuant les calculs indiqués :

$$1 = 12\,b\,\mathrm{R}^3 + 27\,b^2\,\mathrm{R}^2 + 20.4\,b^3\,\mathrm{R} + 5.09\,b^4$$

Divisant tout par le coefficient de R :

$$\mathrm{R}^3 + 2.25\,b\,\mathrm{R}^2 + 1.7\,b^2\,\mathrm{R} + 0.424\,b^3 - \frac{1}{12\,b} = 0$$

Equation du troisième degré contenant son second terme.

Faisons évanouir ce second terme, et, pour cela, posons :

$$\mathrm{R} = u + x$$

u étant une nouvelle inconnue, et x une indéterminée dont nous pouvons disposer à volonté, nous avons :

$$(u + x)^3 + 2.25\,b\,(u + x)^2 + 1.7\,b^2\,(u + x) + 0.424\,b^3$$

$$- \frac{1}{12\,b} = 0$$

Remplaçant, pour plus de commodité :



$$2.25\,b \text{ par A}$$
$$1.7\,b^2 \text{ par B}$$
$$0.424\,b^3 - \frac{1}{12b} \text{ par C}$$

nous avons :

$$(u+x)^3 + A\,(u+x)^2 + B\,(u+x) + C = 0$$

Effectuant les calculs indiqués, il vient :

$$\left.\begin{array}{l|l|l} u^3 + 3\,x & u^2 + 3\,x^2 & u + x^3 \\ \quad + \quad A & \quad + 2\,A\,x & \quad + A\,x^2 \\ & \quad + \quad B & \quad + B\,x \\ & & \quad + C \end{array}\right\} = 0$$

x étant arbitraire, nous posons :

$$3\,x + A = 0$$

et alors l'équation devient :

$$u^3 + u\,(3\,x^2 + 2\,A\,x + B) + x^3 + A\,x^2 + B\,x + C = 0$$

L'équation $u^3 + p\,u + q = 0$ donne :

$$u = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}$$

$$u' = \frac{-1+\sqrt{-3}}{2}\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}$$

$$u'' = \frac{1-2\sqrt{-3}+(\sqrt{-3})^2}{4}\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}$$

Prenant la première de ces valeurs et substituant pour p et q les coefficients de u^1 u^0, on déduit une valeur pour u en fonction de x.

Remplaçant ensuite x par sa valeur $-\frac{A}{3}$ on a une valeur pour R; mais tous ces calculs sont tellement longs, que, pour notre part, nous y avons renoncé et avons préféré faire en grand l'épure représentée *fig.* 13, dans laquelle nous trouvons:

$$A'\,B' = \frac{111}{33}\,AB' = 3.37\,AB'$$

$$A''B'' = \frac{164}{59} AB'' = 2.78\ AB''$$

C'est donc entre AB' et AB'' qu'il faut prendre $\frac{1}{2} b$. En tâtonnant, nous sommes arrivé à :

$$Ab = 53.5, \quad \text{pour } bb' = 160.5$$

donc : $bb = 3Ab.$

Or, on a : $R = 1284$

$$b = 2Ab = 107$$

$$\text{et } \frac{R}{b} = \frac{1284}{107} = 12 \text{ en nombres ronds.}$$

De là le tableau suivant :

Tableau des épaisseurs maxima *à donner aux dents des roues d'engrenage*, *suivant les diamètres*, pour que la hauteur de la dent puisse être égale à 1.2 fois son épaisseur.

DIAMÈTRES des roues.	ÉPAISSEURS des dents b.	HAUTEURS des dents l.	LARGEURS des roues a.
mètres.	centimètres.	centimètres.	centimètres.
0.10	0.42	0.50	1.90
0.20	0.84	1.00	3.80
0.30	1.25	1 50	5.60
0.40	1.67	2.00	7.50
0.50	2.10	2.51	9.45
0.60	2.50	3.00	11.25
0.70	2.92	3.50	13.20
0.80	3.34	4.00	15.00
0.90	3.75	4.50	16.90
1.00	4.17	5.00	18.80
1.20	5.00	6.00	22.50
1.40	5.82	7.00	26.40
1.60	6.66	8.00	30.00
1.80	7.50	9.00	33.80
2.00	8.32	10.00	37.60

On voit, d'après ce tableau, que ce n'est que pour les petits diamètres qu'il y a de la difficulté à faire usage des engrenages à développante, quand l'épaisseur des dents est forte, car



cette épaisseur dépassant rarement 5 centimètres, sitôt que la roue a 1 mètre de diamètre au moins, on n'éprouve plus de difficulté à les employer.

§ 2. — NOMBRE DES DENTS.

La détermination du nombre des dents, si simple quand il s'agit de dents à épicycloïde, est encore une partie assez compliquée des engrenages à développante. En effet, dans les engrenages à développante, les dents allant en diminuant depuis la base jusqu'au sommet, il n'est pas nécessaire de laisser un vide sur la roue égal au plein, comme dans les précédents.

En faisant $b = \frac{1}{12} R$, et $l = 1.2\, b$, l'épaisseur de la dent, à son extrémité, est égale à environ $1/3\, b$. Pour beaucoup de roues un vide égal à $1/2\, b$ serait suffisant, mais dans la plupart des cas il faut faire ce vide égal à $2/3\, b$, surtout si l'on veut qu'une roue puisse engrener avec plusieurs autres de diamètres différents et ayant seulement même pas.

La distance des centres de deux roues n'étant pas rigoureusement déterminée par leurs diamètres, on est obligé, en ne donnant que $1/2\, b$ de vide, d'écarter les roues afin que les dents puissent engrener et dégrener facilement sans faire levier les unes sur les autres. A vide égal à $\frac{2}{3} b$, il est possible de faire pénétrer les dents à fond, dans la plupart des cas.

En admettant cette valeur pour le vide, le pas se trouve égal à $b + {}^2/_3\, b = {}^5/_3\, b = 1.666\, b$, et le nombre des dent, est égal à :

$$\frac{2\pi R}{1.666\, b}$$

Faisons $b = \frac{R}{12}$, alors nous obtenons pour nombre minimum des dents :

$$n = \frac{2\pi R}{1.666\ {}^1/_{12}\, R} = \frac{6.283}{0.139} = 45$$

D'où nous concluons que toute roue d'engrenage à développante, qui n'a pas au moins 45 dents, n'est pas dans des conditions normales.

§ 3. — TRACÉ DES ENGRENAGES A DÉVELOPPANTE.

Soit proposé de résoudre le problème suivant :

Trouver les dimensions de deux roues d'engrenage à développante pour transmettre une force de vingt chevaux d'un arbre à un autre arbre parallèle, dont l'axe est à une distance de 1.^{m}25 de celui du premier, les vitesses de rotation devant être entre elles comme 4 est à 7, et l'arbre moteur faisant 12 tours par minute.

On a :

$$1^{\circ}\ oo' = R + r + 1.2b$$
$$2^{\circ}\ R : r :: 7 : 4$$
$$3^{\circ}\ b = \frac{r}{12} \text{ au maximum.}$$

Nous divisons $oo' = 1.^{m}25$ en deux parties 0.454+0,796 entre elles comme 4 : 7.

Nous trouvons alors :

$$d = 0.^{m}908$$
$$D = 1.^{m}592$$

$$v = \frac{12 \times 3.1416 \times 1.592}{60} = 1.^{m}00 \text{ par } ''$$

La pression tangentielle est :

$$\frac{20 \times 75}{1} = 1500 \text{ kil.}$$

et

$$b^2 = \frac{1500}{100} = 15$$

$$b = \sqrt{15} = 3^{c.m.}87 = 4^{c.m.}00$$

parce qu'il faut plutôt augmenter que diminuer.

Or $12b = 0.^{m}48$ est plus grand que $0.^{m}434$ rayon de la roue. Comme cet excès est faible, on peut conserver cette dimension.

Il vient alors : $l = 1.2 \times 4 = 4^{c.m.}8$

$$a = 4.5 \times 4 = 18^{c.m.}0$$

et

$$1.^{m}25 = R + r + 0.^{m}05$$

0.05 au lieu de 0.048, afin que les dents ne touchent pas à fond.

Or : $$r = \frac{4\,R}{7}$$

donc : $$1.25 = R + \frac{4\,R}{7} + 0.05$$

et $$R = \frac{8.75 - 0.35}{11} = 0.^{m}765$$

$$r = \frac{4}{7}\,R = 0.^{m}435$$

$$b + \frac{2}{3}\,b = \frac{5}{3}\,b = \frac{5}{3} \times 4 = \frac{20}{3} = 6^{c.m.}66$$

$$\frac{6.283 \times 0.765}{0.^{m}06666} = 72 \text{ dents.}$$

Grande roue . $\frac{4}{7} \times 72 = 41$ dents.
Petite roue. .

On fait alors l'épure, représentée *fig.* 13, dans laquelle on remarque que trois dents sont toujours en contact; seulement les dents sont un peu pointues, surtout dans la petite roue, ce qui indique que la valeur de b que nous avons donnée est réellement *maxima*.

On remarque encore que le vide est assez considérable; il y aurait peut être possibilité de rapprocher les dents; alors, au lieu du minimum 45, on aurait peut-être 50, mais pas plus.

ARTICLE III.

COMPARAISON ENTRE LES ENGRENAGES A ÉPICYCLOÏDE ET LES ENGRENAGES A DÉVELOPPANTE.

1° Soient oo' (*fig.* 6) les centres de deux engrenages à épicycloïde, et oo' (*fig.* 13) les centres de deux engrenages à développante.

La tangente AB, commune aux deux roues (*fig.* 13), contient tous les points de contact des dents; la pression de la roue OA sur la roue OB s'exerce donc *toujours* suivant la direction de cette tangente, et est par conséquent constante.

Dans l'engrenage à épicycloïde, au contraire, les normales à la courbe passant par les points de contact, sont des droites

comprises entre la tangente et la normale au cercle. Il en résulte alors que la perpendiculaire abaissée du centre O sur la normale variable du point de contact, est d'abord égale au rayon O A quand le contact est en A, puis va en diminuant au fur et à mesure que le point de contact va en s'abaissant.

Le travail transmis restant le même tout le temps, si P, P', P'', etc., sont les diverses pressions, p, p', p'', etc., les bras de levier, c'est-à-dire les perpendiculaires abaissées du centre O sur la normale variable de l'épicycloïde d'une dent, on a :

$$Pp = P'p' = P''p'', \text{ etc.}$$

et, comme les bras de levier $pp'p''$, etc., vont en diminuant depuis $p = r$ jusqu'à $p^n = fr < r$, il en résulte que les pressions P, P', etc., vont en augmentant au fur et à mesure que le point de contact de la dent approche de son extrémité.

Or, le contact des dents les unes contre les autres ne se fait pas sans frottement, et comme le frottement est proportionnel à la pression, il résulte de ce que nous venons de voir que les engrenages à développante *s'usent* uniformément, tandis que les engrenages à épicycloïde s'usent plus vers l'extrémité des dents que sur le milieu.

Dans les premiers, l'usure n'a d'autre inconvénient que d'amincir les dents, car elles conservent leur forme.

Dans les seconds, l'usure a pour inconvénient de déformer les dents et de les arrondir vers leur extrémité.

2° Pour construire une roue d'engrenage à développante, il suffit de connaître son diamètre et l'épaisseur des dents.

Pour construire une roue d'engrenage à épicycloïde, il faut connaître son diamètre, l'épaisseur des dents et le diamètre de la roue avec laquelle elle doit engrener.

Il résulte de là que :

Une roue d'engrenage à développante peut s'accoupler avec un nombre infini d'autres roues du même genre, ayant même pas;

Une roue d'engrenage à épicycloïde ne peut s'accoupler qu'avec une seule roue.

3° Quand deux engrenages à développante sont accouplés, les axes sur lesquels ils sont montés peuvent s'éloigner de quelques millimètres par suite de tassements ou autres causes, sans que les engrenages cessent de fonctionner convenablement.

Quand deux engrenages à épicycloïde sont accouplés, la distance des axes doit rester rigoureusement constante, sans quoi ils cessent de fonctionner convenablement.

CHAPITRE II.

ENGRENAGES CONIQUES.

Soient OA, OB (*fig.* 14) deux axes concourant en un même point o, et animés de vitesses de rotation qui sont entre elles comme $m : n$. Par le point C, nous menons la droite OC telle que les perpendiculaires CP, CQ, abaissées d'un point quelconque C de cette droite sur OA et OB, soient entre elles comme $n : m$. Pour cela, nous menons une parallèle A'O' à AO à une distance $= n$, et une parallèle B'O'' à BO à une distance $= m$; le point d'intersection C' de ces deux parallèles donne un point de la droite OC.

Si alors, considérant CP et CQ comme les rayons de deux cercles, dont les centres sont en P et Q, situés dans deux plans perpendiculaires aux axes AO et OB, nous faisons tourner la droite OC sur chacune des circonférences de ces deux cercles, de manière à ce qu'elle passe toujours par le point O, nous engendrons deux cônes tangents l'un à l'autre, suivant l'arête commune OC, et dont les circonférences en contact sont partout entre elles dans le rapport voulu, c'est-à-dire que l'on a :

$$\text{Circ. PC} : \text{circ. QC} :: n : m$$

et pour les vitesses, si on désigne par v la vitesse d'un point de la circonférence PC, et v' celle d'un point de la circonférence QC :

$$v \times \text{circ. PC} = v' \times \text{circ. QC}$$

d'où :

$$v : v' :: m : n.$$

Si maintenant nous munissons chacun de ces cônes de dents d'engrenage comme nous avons fait précédemment pour les cylindres, nous pourrons transmettre la vitesse de rotation d'un arbre à l'autre, quelque résistance qu'offre d'ailleurs le second arbre au mouvement.

Dans les engrenages coniques, comme dans les engrenages cylindriques, on considère deux espèces de dents, savoir :

Les dents à épicycloïde ;

Les dents à développante.

Seulement ici ce ne sont plus des courbes planes, mais des courbes dont tous les points sont également éloignés du point o de rencontre des axes, c'est-à-dire situés sur une sphère dont le centre est o; ces courbes se nomment, par cette raison ;

Epicycloïde sphérique ;

Développante sphérique.

La géométrie descriptive donne des moyens simples pour déterminer les projections de ces deux courbes; mais de leurs projections à elles-mêmes, il y a un si grand pas à faire, qu'il faut renoncer à en faire usage dans les engrenages coniques, se contentant de les y imiter tant bien que mal, par des arcs de cercle, ce qui, il faut le dire, est suffisant pour la pratique.

§ 1er. — DIMENSION DES DENTS.

Laissant de côté la forme des dents qui, quand on veut imiter l'épicycloïde sphérique, ont une section semblable à celle des dents de roues cylindriques à épicycloïde circulaire, et qui, quand on veut imiter la développante sphérique, ont une section analogue à celle des dents de roues cylindriques à développante de cercle, nous allons indiquer le moyen de construire une dent, connaissant la valeur de b, son épaisseur moyenne.

Comme pour les engrenages cylindriques on a :

$$b^2 = \frac{P}{100}$$

$$l = 1.2\, b$$

$$a = 1.5\, b$$

Soit ABCD (*fig.* 15) le tronc de cône formant la surface extérieure d'une roue d'engrenage conique non munie de ses dents. Par le milieu E de AB nous menons la parallèle EF aux bases et nous décrivons sur EF une demi-circonférence; c'est sur cette demi-circonférence que l'on prend b.

Soit $ab = b$: du point a et b nous abaissons les perpendiculaires aa', bb' sur EF, et nous joignons $a'o$, $b'o$ par des droites qui nous donnent la projection $cdef$ de la dent sur la projection de sa surface.

Pour avoir toutes les dimensions, on remarque que la circonférence EF est égale à la demi-somme des deux autres AD et BC; on a donc aussi, en appelant b' et b'' les épaisseurs sur les circonférences AD et BC :

$$b = \frac{b' + b''}{2} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

On a, d'après la figure :

$$BC : EF : AD :: BO : EO : AO$$

donc : $b'' : b : b' :: BO : EO : AO$

d'où :
$$b'' = b\,\frac{BO}{EO}$$

$$b' = b\,\frac{AO}{EO}$$

On a maintenant :

$$AB = a = 4.5\,b$$

OB se détermine d'après des considérations relatives à l'exécution et au montage, on en déduit $OA = AB + OB$.

Faisant $OB = \delta$, il vient :

$$b'' = b\,\frac{\delta}{\delta + {}^1\!/_2\,a} \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

$$b' = b\,\frac{\delta + a}{\delta + {}^1\!/_2\,a} \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

De l'équation (1), on tire, comme vérification :

$$b' + b'' = 2\,b$$

Pour déterminer les hauteurs extrêmes d'une dent, au point E on élève une perpendiculaire E E' sur AO, et on prend E $E' = L = 1.2\,b$. On joint E'O, et on élève des perpendiculaires en A et en B qui donnent :

$$AA' : EE' : BB' :: AO : EO : BO$$
$$:: b' : b : b''$$

donc :
$$AA' = 1.2\,b'$$
$$BB' = 1.2\,b''$$

b', b'', l', l'' et a sont les dimensions qu'il est nécessaire de donner au modeleur.

§ 2. — ÉPURE DE ROUES D'ENGRENAGES CONIQUES.

Soient OA, OB (*fig.* 16) deux axes concourant en un même point ; OC la ligne génératrice de deux cônes tangents dont les vitesses de rotation sont dans un rapport voulu.

Soit $OD = \delta$, $DE = a$: des deux points D et E nous abaissons les perpendiculaires DF, DF', EG, EG' sur les axes AO, OB, et nous les prolongeons de quantités égales à elles-mêmes FH, F'H', GE, G'E', et nous achevons les projections des des deux troncs de cône DEHI, DEH'I'.

Par les points D et E nous menons des perpendiculaires à la droite O C, qui vont rencontrer les axes O A, O B aux points K, L, M, N, et nous considérons ces droites comme les génératrices de quatre nouveaux cônes ayant pour sommets les points K, L, M, N, et leurs génératrices perpendiculaires à celles des troncs de cône en contact. Sur E I et E I' comme diamètres, nous décrivons deux demi-circonférences sur lesquelles nous faisons la division en pas comme pour les engrenages cylindriques, l'épaisseur *b'* des dents étant connue. Nous projetons ensuite tous les points de division de ces demi-circonférences sur leurs diamètres, et par tous les points ainsi projetés nous menons deux droites l'une allant au sommet *o* des troncs de cône, l'autre au sommet M ou N du cône normal correspondant. Nous obtenons ainsi, pour les engrenages à épicycloïde, la projection de la portion des dents coupées par les cônes moyens, et pour les engrenages à développante, la projection de la base des dents, en supposant toutefois que dans ce cas on laisse un intervalle entre les cônes primitifs.

Par des constructions analogues et simples on obtient la projection des extrémités des dents et des portions de courbes que du reste on imite le plus souvent au compas. La figure 16 donne tous les détails de l'épure en question.

CHAPITRE III.

ENGRENAGES DANS L'ESPACE.

Lorsque deux axes ne sont ni parallèles, ni concourant en un même point, il existe deux moyens de transmettre le mouvement de l'un à l'autre, savoir :

1° En joignant les axes par un troisième et adaptant à chacun des points de concours un couple d'engrenages coniques ;

2° En construisant les roues et leurs dents suivant des formes et dimensions convenables pour satisfaire aux mêmes conditions de transmission de mouvement que celles auxquelles satisfont les engrenages cylindriques et coniques.

La recherche d'un engrenage de ce genre a donné lieu à un travail remarquable de notre ancien professeur M. *Olivier*, et auquel nous renvoyons les personnes qui désireraient connaître ce genre de roue.

Nous donnerons seulement une copie du mémoire rédigé par M. *Brocchi*, d'après les renseignements de M. Olivier, lorsqu'un modéle d'engrenage de ce genre fut exécuté pour la Société d'encouragement.

Engrenage à développante de cercle, de deux roues à axes inclinés qui ne se rencontrent pas.

Lorsqu'on a deux lignes droites situées d'une manière quelconque dans l'espace et qui ne se rencontrent pas, on peut toujours considérer l'une comme l'axe d'une hyperboloïde de révolution, et l'autre comme la génératrice de cette surface. Tel est le principe qui nous a guidé pour la confection de l'engrenage dont nous allons nous occuper.

Soient donc deux droites quelconques prises pour axes de nos roues. Pour construire l'épure, nous adopterons pour plans de projection un plan perpendiculaire à la première droite, que nous regarderons comme l'axe de la surface hyperboloïde, et un autre mené parallèlement à la deuxième droite, qui sera la génératrice.

Soit B (*fig.* 17) la projection horizontale de la première droite et le centre de la roue. Soit C le centre du cercle primitif du pignon. Ces deux cercles, dont les rayons BD, DC seront dans le rapport de leur vitesse angulaire de rotation, se touchant au point D.

Par ce point de contact, menons une ligne ADE parallèle au plan vertical; abaissons par les centres les perpendiculaires BR, C*r*, nous aurons ainsi les rayons des deux cercles secondaires qui, évidemment, seront dans le même rapport que les rayons des cercles primitifs. Soit, par exemple, de quatre à trois ce rapport : les circonférences étant entre elles comme leurs rayons, si on divise la circonférence de la roue en 24 parties, celle du pignon sera divisée en 18, et chacune de ces parties donnera une dent de l'engrenage.

Pour que chaque point de division soit l'origine des développantes de cercle qui sont les directrices des surfaces cylindriques des dents, et que de plus, cette origine doit se trouver sur les cercles secondaires, on prend la portion de la tangente comprise entre R et D, et on la porte de R en *d* sur le cercle. A partir du point *d*, on effectue la division en 24 parties égales.

Ayant les points d'origine de nos dents, nous allons en déterminer la longueur. Or, pour cela, nous connaissons le nombre de touches simultanées des dents de la roue et du pignon, et nous savons qu'elles se trouvent toutes sur la tangente ABE. Soit *m* la dernière touche, du point B comme centre, avec B*m* pour rayon, je décris le cercle *m*, *m*, *m* qui

limitera l'étendue des développantes, et par suite la longueur des dents.

Après avoir ainsi déterminé les dents de la roue, et établi entre elles le vide nécessaire pour y loger les dents du pignon, il nous reste à tracer ces dernières. Et, s'il ne s'agissait que d'un engrenage à axes parallèles, nous nous servirions des mêmes procédés : mais, ici, nous ne pouvons le faire ; car, nos axes étant inclinés, il faut nécessairement augmenter le diamètre du cercle tangent du pignon d'une certaine quantité, que nous allons déterminer. Soit FG la projection verticale de l'axe de la roue : par un point quelconque de cette droite, on élève une perpendiculaire LMN, qu'on considère comme la trace du plan horizontal qui partagerait en deux parties égales l'épaisseur des dents de la roue. Cette épaisseur, d'ailleurs, est arbitrairement déterminée par deux plans horizontaux équidistants du plan LMN et désignés par leurs traces HI et KO.

Nous pouvons considérer la tangente ADE comme étant la trace horizontale d'un plan tangent à deux cylindres dont les bases sont les cercles secondaires de la roue et du pignon, et sur lesquels se trouvent attachées les dents. Alors, ce plan coupera les surfaces des dents suivant des droites dont les projections horizontales sont l, D, m, et les projections verticales sont $l'l''$, $d'd''$, $m'm''$. Puisque le plan vertical de projection est parallèle aux deux axes, si on mène la droite quelconque PQ, telle que l'angle FPQ soit l'angle des deux axes, on aura une parallèle à la projection verticale de l'axe du pignon.

Maintenant par le point M, projection verticale de la touche intermédiaire, j'abaisse la perpendiculaire SMT sur PQ, et par les points extrêmes L'', m', j'y mène les parallèles UV et XV, qui seront les traces des plans équidistants limitant l'épaisseur des dents du pignon. En prolongeant les arêtes $l'l''$, $d'd''$, $m'm''$ des dents de la roue rencontrées par le plan dont ADE est la trace, jusqu'à la rencontre des plans précédents, on a la longueur totale des arêtes des dents du pignon dont chacune coïncide en partie avec les arêtes des premières.

Tout ce que nous venons de dire fait voir que les distances des arêtes des dents des roues rencontrées par le plan tangent normal aux développantes qui leur servent de bases, sont toutes égales à $l'd'$ ou $d'm'$; car elles sont prises sur la trace d'un plan horizontal perpendiculaire à l'axe de la roue. Ces

distances de 13 millimètres dans la figure sont égales entre les arêtes du pignon prises sur ce même plan : mais elles sont de 15 millimètres mesurées sur l'intersection du plan tangent avec un plan perpendiculaire à l'axe du pignon qui est incliné, distances prises de l'' à O, et de q à m'.

Il nous reste encore, pour l'exécution de l'engrenage, à faire le tracé du pignon sur un plan perpendiculaire à son axe. Pour cela, on remarque que les plans SMT et LMN, plans milieux de la roue et du pignon se coupent en une ligne dont M est la projection verticale et DD' sa projection horizontale. Si, autour de cette intersection, comme charnière, on fait tourner le plan SMT jusqu'à ce qu'il coïncide avec le plan LMN, les deux autres plans qui lui seront parallèles, seront entraînés et prendront les positions U'V' et X'Y', et les arêtes des surfaces héliçoïdales (intersections des dents du pignon avec le plan tangent ADE) se placeront en $l''' l^{\text{IV}}$, $d''' d^{\text{IV}}$, $m''' m^{\text{IV}}$, et leurs projections horizontales seront confondues avec la trace de ce plan.

Nous avons dit que le cercle tangent du pignon devait être plus grand d'une certaine quantité proportionnée à la grandeur de l'angle projeté des deux axes, angle qui ne doit pas surpasser quarante-cinq degrés, et nous avons tout ce qu'il nous faut pour connaître la longueur du rayon. En effet, 13 millimètres étant la distance entre deux dents prises sur la tangente ADE ou sur une des traces perpendiculaires à l'axe de la roue; 38 millimètres, la longueur du rayon Cr du cercle tangent provisoire du pignon; 15 millimètres, la distance entre deux dents prises sur un plan perpendiculaire à l'axe du pignon, nous trouverons que la longueur du rayon que nous cherchons est de $\frac{15 \times 38}{13} = 43^{\text{m.m.}}\ 11/13$. Portant cette distance sur une perpendiculaire à la tangente ADE, et, par son extrémité, menant une parallèle hC' jusqu'à la rencontre de la ligne des centres, la perpendiculaire C'r' sera le rayon du cercle tangent définitif du pignon considéré comme ayant tourné sur DD' comme charnière pour devenir horizontal, et si par le centre C' on élève une verticale Z'G', on aura l'axe du pignon.

L'épaisseur du cylindre tangent du pignon étant donnée par la distance des deux plans UV et XY, si on porte la moitié de cette distance de M en M' et M'', et si par ces points on

mène les lignes X'M'Y', U'M''V', ces lignes représenteront les plans inférieur et supérieur qui limitent l'épaisseur des dents. Dans cette position, les points extrêmes des arêtes *l'' l' p*, *o*M*q*, *n m'' m'* seront transportés en *l''' l*ⁱᵛ, *d''' d*ⁱᵛ, *m''' m*ⁱᵛ, par des arcs de cercle décrits du point M comme centre. Nous pouvons actuellement tracer le pignon sur le plan horizontal ; mais avant de nous en occuper, il faut déterminer la position que cet axe du pignon occupe, lorsque les dents de celui-ci engrènent avec celles de la roue.

D'abord, nous savons que cet axe doit être parallèle à PQ : si donc nous connaissions seulement un point de la position cherchée, elle serait déterminée. Mais le point *z* de l'axe dans sa position verticale est la projection du centre C' du pignon sur le plan supérieur U'V', et dans le mouvement du plan de U'V' en UV, le point *z* sera en *z'*, et par *z'* menant une parallèle à PQ, on aura l'axe G*z*.

Pour avoir le tracé horizontal du pignon, par les extrémités supérieures des arêtes d'intersection *l'''*, *d'''*, *m'''*, on abaisse des perpendiculaires sur la trace AE du plan tangent, et par les points d'intersection avec cette trace, on fait passer les développantes du cercle tangent C'*r'*, et on a leurs points d'origine à la circonférence considérée dans le plan supérieur du pignon. Et, comme on a la distance qui existe entre deux origines de développantes, on les peut tracer toutes. Si *m* fait de même pour les extrémités inférieures, on aura toutes les développantes directrices pour le plan inférieur du pignon. Elles sont toutes terminées par deux cercles concentriques dont les rayons sont C'*b*, C'*a*. Les vides des dents du pignon sont déterminés par la longueur et la séparation des dents de la roue, et réciproquement.

LIVRE VI.

STATIQUE.

INTRODUCTION.

La statique a pour but la recherche des conditions de l'équilibre des forces qui agissent sur un même corps, quel que soit d'ailleurs celui des deux états, *repos* ou *mouvement*, dans lequel il se trouve.

On nomme *force* une cause quelconque de mouvement.

Les forces ne sont pas toutes égales entre elles; afin de comparer leurs *actions* sur un même corps, on les représente par des longueurs proportionnelles ou par des chiffres.

On nomme *résultante* de deux ou plusieurs forces, une force dont l'effet est le même que celui de toutes ces forces réunies, dites *composantes*.

On nomme *direction* d'une force, la ligne suivant laquelle a lieu son action. La direction d'une force est toujours une ligne droite.

Lorsque deux ou plusieurs forces agissent sur un même corps, on considère trois espèces de directions relatives pour l'ensemble de ces forces, savoir :

1° Les forces dirigées parallèlement les unes aux autres, dites *forces parallèles*;

2° Les forces dirigées vers un même point, dites *forces concourantes*;

3° Les forces dirigées d'une manière quelconque dans l'espace.

Chacun de ces cas donne lieu à des conditions d'équilibre différentes, dont la détermination constitue la statique ou *science de l'équilibre des forces*.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

1° *Deux forces égales et contraires, dirigées suivant une même droite, sont en équilibre.*

2° *Le point d'application d'une force peut être considéré en un point quelconque de sa direction.*

3° *Deux forces, appliquées en un même point, ont pour résultante une force appliquée en ce point;*

4° Deux forces quelconques, dirigées suivant une même droite et agissant dans le même sens ou en sens contraire, s'ajoutent ou se retranchent et ne font plus qu'une seule et même force égale à leur somme ou à leur différence.

CHAPITRE Ier.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES FORCES AGISSANT PARALLÈLEMENT SUR UN MÊME CORPS.

ARTICLE Ier.

RÉSULTANTE DES FORCES PARALLÈLES.

§ 1er. — RÉSULTANTE DE DEUX FORCES PARALLÈLES.

1° Soient P et Q (*Pl.* V, *fig.* 1) deux forces parallèles agissant dans les directions AP, BQ; menons un plan par ces deux droites, et, dans ce plan, une droite quelconque AB rencontrant les directions de ces forces aux points A et B.

Aux extrémités A et B de la droite AB, et suivant la direction de cette droite, appliquons deux forces M et N, égales entre elles, contraires et d'une intensité quelconque; ces deux forces se font équilibre, leur effet est donc nul, et la résultante des quatre forces M, N, P, Q est la même que celle des deux forces P et Q.

Les deux forces M et P, appliquées au point A, ont pour résultante une force appliquée au même point; cette résultante est située dans le plan des deux forces, car leurs actions ont lieu toutes deux dans ce plan; de plus, elle est située dans l'angle MAP, car son effet est d'exercer sur le point A une action moyenne entre celle de ces deux forces.

Soit S la résultante des deux forces P et M.

Soit, pareillement, T la résultante des deux forces Q et N. Ces deux forces étant situées dans le même plan, et non parallèles, se rencontrent en un point D, et leur résultante est la résultante des deux forces P et Q.

Considérant le point D comme leur point d'application, nous appliquons à ce point deux forces M', P' égales et parallèles aux deux forces M et P appliquées au point A.

L'effet de la force S étant le même que celui des deux forces M et P, est aussi le même que celui des deux forces M' et P' égales et parallèles à M et P; par conséquent, on peut remplacer la force S par les deux forces M' et P' agissant sur le point D.

Par la même raison on peut remplacer la force T par les deux forces N' et Q', égales et parallèles à N et Q, appliquées au point D. On a alors, au lieu des deux forces S et T, appliquées au point D, les quatre forces M', N', P', Q', dont deux, M' et N', sont égales entre elles, opposées, et par conséquent se détruisent, et deux, P' et Q', sont dirigées suivant la même droite et s'ajoutent.

La force P' + Q', appliquée au point D, est donc la résultante des deux forces S et T, et par conséquent des deux forces P et Q ; d'où ce principe :

La résultante de deux forces parallèles est dirigée parallèlement à ces deux forces et égale à leur somme.

2° Soit R la résultante des deux forces P et Q, on a : R = P' + Q' = P + Q. Considérons R comme appliquée au point C de rencontre de sa direction avec la droite AB, et voyons quelles doivent être les distances AC, CB pour différentes valeurs relatives des forces P et Q ; supposons que l'on ait :

$$P : Q :: m : n$$

Il peut se présenter deux cas, savoir :

$$1^{\circ}\ m = n$$

$$2^{\circ}\ m \lessgtr n$$

Dans le premier cas on a P = Q.

Alors, supposant M = N = P, la résultante S des deux forces égales M et P, appliquées au point A, a pour direction une droite qui partage l'angle MAP en deux parties égales, car il n'y a pas plus de raison pour qu'elle fasse un angle plus petit avec l'une qu'avec l'autre de ces deux forces égales entre elles.

Or, dans le triangle ACD, on a :

Angle ADC = PAS comme interne externe ;
Angle DAC = MAS comme opposés par le sommet ;
Angle PAS = MAS par hypothèse ;
donc Angle ADC = DAC

Le triangle ADC est donc isoscèle, et on a :

$$AC = CD$$

On démontre de même que, dans le triangle DCB, on a :

$$CB = CD$$

Deux quantités, égales à une troisième, sont égales entre elles et on a :

$$AC = CB$$

D'où le principe : *Quand les forces P et Q sont égales entre elles, le point d'application de la résultante est situé au milieu de A B.*

Dans le second cas on a $P \lessgtr Q$, et de la proportion on tire :

$$\frac{P}{m} = \frac{Q}{n}$$

Divisons AB (*fig.* 2) en deux parties qui soient entre elles :: m : n, nous aurons :

$$AE : EB :: m : n.$$

Prenons AD = AE, BD' = BE, et divisons DE en 2 m et ED' en 2 n parties égales. Les divisions de DE seront égales aux divisions de ED', car de la proportion ci-dessus on tire :

$$\frac{AE}{m} = \frac{EB}{n}$$

et :

$$\frac{2\,AE}{2\,m} = \frac{2\,EB}{2\,n}$$

Au milieu de chacune des divisions de DE, appliquons une force $\frac{P}{2\,m}$ parallèle à P, et au milieu de chacune des divisions de ED' appliquons une force $\frac{Q}{2\,n}$ parallèle à Q.

De l'équation $\frac{P}{m} = \frac{Q}{n}$ on tire :

$$\frac{P}{2\,m} = \frac{Q}{2\,n}$$

Donc les 2 m forces appliquées aux milieux de chacune des divisions de DE sont égales aux 2 n forces appliquées aux milieux de chacune des divisions de ED'.

Prenons les forces $\frac{P}{2m}$ deux à deux et également éloignées du point A; leurs résultantes seront dirigées suivant A P et égales à $\frac{2P}{2m} = \frac{P}{m}$, et comme il y a m divisions de part et d'autre, on a, au point A, m résultantes égales à $\frac{P}{m}$ ou $\frac{mP}{m} = P$. La force P est donc la résultante de toutes ces forces et peut être remplacée par elles.

Par la même raison, la force Q est la résultante des $2n$ forces égales à $\frac{Q}{2n}$ et appliquées aux milieux des $2n$ points de division de E D', et peut être remplacée par ces forces.

Or on a : $\frac{P}{2m} = \frac{Q}{2n}$; les $2m + 2n$ forces appliquées aux milieux des points de division de DD' étant égales entre elles, leur résultante totale est située au point C, milieu de DD', et on a :

$$R = \frac{2mP}{2m} + \frac{2nQ}{2n} = P + Q$$

Pour déterminer la position du point C, par rapport aux points A et B, nous avons :

$$DC = CD' = \tfrac{1}{2} DD'$$
$$AB = AE + EB = AD + BD' = \tfrac{1}{2} DD'$$
$$AB = DC$$

Retranchant de part et d'autre la partie commune A E, il vient :

$$AB - AC = DC - AC$$
$$CB = DA = AE$$

d'où :

$$AC = BE$$

d'où ; $CB : AC :: AE : BE :: m : n :: P : Q$

et le principe : *La résultante de deux forces parallèles partage la droite qui unit ces deux forces en deux parties réciproquement proportionnelles à ces forces.*

§ 2. — RÉSULTANTE D'UN NOMBRE QUELCONQUE DE FORCES PARALLÈLES DANS L'ESPACE.

1° Soient tant de forces parallèles que l'on voudra, P, P' P'', etc., dirigées dans le même sens (*fig.* 3) ; pour obtenir leur résultante, nous prenons deux quelconques de ces forces P et P' que nous unissons par une droite AB. Nous déterminons le point d'application C de la résultante P + P' en posant les proportions :

$$P : P' :: BC : AC$$

et $P + P' : P' :: AB : AC$ ou x que nous déterminons en cherchant une quatrième proportionnelle à $P + P'$, P' et AB.

Cela fait, nous joignons le point C à un point quelconque D de la force P'', et nous déterminons le point d'application C' de la résultante des deux forces P + P' et P'' par la même méthode que ci-dessus, et ainsi de suite.

D'où le principe : *Pour trouver la résultante de tant de forces parallèles que l'on voudra, dirigées dans le même sens, on détermine la position de la résultante de deux de ces forces, puis celle de la résultante de cette première résultante et d'une troisième force, et ainsi de suite.*

2° Lorsqu'une partie des forces est dirigée dans un sens, et l'autre en sens contraire, il y a deux résultantes dirigées chacune dans un sens opposé. Il peut alors se présenter quatre cas :

1° Ou ces résultantes sont égales et parallèles,
2° Ou ces résultantes sont inégales et parallèles,
3° Ou ces résultantes sont égales et opposées,
4° Ou ces résultantes sont inégales et opposées.

Dans le premier cas, les deux résultantes forment ce que l'on appelle un *couple* qui est alors la résultante du système total.

Dans le second cas, les deux résultantes peuvent se convertir en un couple et une force égale à la différence des deux résultantes.

Dans le troisième cas, les deux résultantes se détruisent, et la résultante totale est zéro.

Dans le quatrième cas, les deux résultantes se retranchent l'une de l'autre, et la résultante totale est égale à leur différence et dirigée dans le sens de la plus grande.

ARTICLE II.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES FORCES PARALLÈLES.

1° Soit R la résultante de deux forces parallèles P, Q, dirigées dans le même sens ; toute force — R égale et directement opposée à R fait équilibre aux deux forces P et Q; car elle fait équilibre à leur résultante dont l'effet est le même que celui de ces deux forces.

De là le principe : *Pour faire équilibre à tant de forces parallèles que l'on voudra diriger dans le même sens, il suffit d'appliquer une force égale et directement opposée à la résultante de toutes ces forces.*

2° Si on a un nombre quelconque de forces parallèles dont les unes sont dirigées dans un sens, et les autres dans le sens opposé, il peut se présenter quatre cas, comme ci-dessus, savoir :

1° Si les deux résultantes sont égales et parallèles, l'équilibre a lieu en appliquant un *couple* égal et contraire au couple résultant.

2° Si les deux résultantes sont inégales et parallèles, l'équilibre a lieu en appliquant une force et un couple égaux et opposés à la force et au couple par lequel on les remplace.

3° Si les deux résultantes sont égales et opposées, l'équilibre existe naturellement.

4° Si les deux résultantes sont inégales et opposées, l'équilibre a lieu en appliquant du côté de la plus petite une force égale à la différence entre elles.

CHAPITRE II.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES FORCES CONCOURANTES.

ARTICLE Ier.

RÉSULTANTE DES FORCES CONCOURANTES.

§ 1er. — RÉSULTANTE DE DEUX FORCES APPLIQUÉES EN UN MÊME POINT.

1° Soient P et Q (*fig.* 4) deux forces appliquées au point *o*, et supposons qu'elles soient entre elles comme les longueurs OA, OB prises sur leurs directions, nous aurons :

P : Q :: AO : OB.

Achevons le parallélogramme A O B D, et joignons O D; O D est la direction de la résultante des deux forces P et Q.

En effet, la résultante des deux forces P et Q passe par le point *o* (*notions préliminaires*), si donc nous démontrons qu'elle passe par le point D, il sera évident qu'elle prend la direction O D.

Or, prenons BE = DB et achevons le losange BDFE. Aux deux extrémités de EF, appliquons deux forces Q', — Q', égales à Q et opposées; ces deux forces se font équilibre, leur effet est nul, et la résultante des quatre forces P, Q, Q' — Q' est la même que celle des deux forces P et Q.

Les deux forces P et Q' parallèles et appliquées aux extrémités de la droite OE, ont leur résultante appliquée en un point de OE qui divise cette droite en deux parties réciproquement proportionnelles à P et Q'. Or, de la proportion :

P : Q :: AO : BO

on tire, en remplaçant Q par son égal Q' et AO par son égal BE = BD :

P : Q' :: BE : BO.

Le point B divisant OE en parties réciproquement proportionnelles à P et Q', est le point demandé, et la résultante des deux forces P et Q' est dirigée suivant BD parallèle à P et à Q'.

Les deux forces Q, —Q', égales entre elles et appliquées en un même point E, ont pour résultante une force qui divise l'angle Q'EQ en deux parties égales, c'est-à-dire située sur le prolongement de la diagonale du losange DBEF.

Considérant le point D comme point d'application de la résultante des deux forces P et Q' sur la direction de laquelle il est situé, et comme point d'application de la résultante des deux forces Q et Q' sur la direction de laquelle il est aussi situé, la résultante des deux forces P et Q sera la même que celle de ces deux nouvelles résultantes appliquées au point D. Or, la résultante de deux forces appliquées au point D passe par ce point, d'où nous concluons le principe :

La résultante de deux forces, appliquées en un même point, est dirigée suivant la diagonale du parallélogramme construit sur ces deux forces.

2° Soit R la résultante des deux forces P et Q : si nous appliquons au point O une force — R égale et directement opposée à R, cette force fait équilibre aux deux forces P et Q, et

on a, autour du point O, trois forces en équilibre, auquel cas l'une quelconque de ces forces est égale et directement opposée à la résultante des deux autres.

Prolongeons QO du côté du point O et achevons le parallélogramme, connaissant un côté AO et les directions de l'autre côté OD' et de la diagonale OB', OB' est la résultante des deux forces AO et OD'.

Or, on a : $OB' = AD = OB = Q$;

donc : $OD' = -R$;

mais : $OD' = AB' = OD$

Nous en concluons le principe : *La résultante de deux forces, appliquées en un même point, est égale à la diagonale du parallélogramme construit sur ces deux forces.*

§ 2. — FORMULES TRIGONOMÉTRIQUES.

Dans le triangle AOD (*fig.* 4), on a :

$$AO = P$$
$$OD = R$$
$$AD = OB = Q$$

Or, dans un triangle rectiligne quelconque, les sinus des angles sont entre eux comme les côtés opposés, on a donc :

$$AO : AD : OD :: \sin. D : \sin. O : \sin. A,$$

c'est-à-dire :

$$P : Q : R :: \sin. DOB : \sin. AOD : \sin. A.$$

Si les forces P et Q forment entre elles un angle droit (*fig.* 5), on a :

$$\text{Angle } OAC = AOB = AOC + ACO$$

d'où : $P : Q : R :: \sin. COB : \sin. AOC : 1$

Soit $COB = \alpha$

on a : $\sin. AOC = \cos. \alpha$

c'est-à-dire : $P : Q : R :: \sin. \alpha : \cos. \alpha : 1$

d'où :

$$P = R \sin. \alpha$$
$$Q = R \cos. \alpha$$

et

$$P^2 = R^2 \sin.^2\alpha$$
$$Q^2 = R^2 \cos.^2\alpha$$

d'où : $P^2 + Q^2 = R^2 (\sin.^2\alpha + \cos.^2\alpha) = R^2$

ce qui se déduit aussi facilement du triangle rectangle.

§ 3. — PARALLÉLIPIPÈDE DES FORCES.

Soient P, Q, R (*fig.* 6) trois forces appliquées en un même point et dirigées d'une manière quelconque; la résultante de ces trois forces est la diagonale du parallélipipède construit sur ces forces.

En effet, si nous prenons d'abord les deux forces Q et R et construisons le parallélogramme sur ces deux forces, nous obtenons la résultante S. Si ensuite nous construisons le parallélogramme sur S et P, nous obtenons la résultante T; mais le parallélogramme construit sur S et P coupe le parallélipipède en deux parties égales et contient une de ses diagonales.

§ 4. — RÉSULTANTE D'UN NOMBRE QUELCONQUE DE FORCES CONCOURANTES.

Soient P, P', P'' etc. (*fig.* 7) tant de forces que l'on voudra, appliquées à un même point *o*, dans des directions quelconques.

Pour obtenir leur résultante, nous prenons deux quelconques de ces forces, P et P', et nous construisons le parallélogramme sur ces deux forces; nous obtenons la résultante R. Nous construisons le parallélogramme sur R et une troisième force quelconque P'', et nous obtenons la résultante R', et ainsi de suite.

ARTICLE II.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES FORCES CONCOURANTES.

Il n'existe qu'une condition d'équilibre pour les forces concourantes et consistant dans l'application d'une force égale et directement opposée à la résultante de toutes ces forces.

CHAPITRE III.

FORCES DIRIGÉES D'UNE MANIÈRE QUELCONQUE DANS L'ESPACE.

SECTION PREMIÈRE.

THÉORIE DES COUPLES.

Nous avons dit que deux forces opposées, égales entre elles et parallèles, constituaient un couple; pour rendre cette définition plus claire nous dirons :

Un couple est un assemblage de deux forces situées dans un même plan, égales, opposées et perpendiculaires aux extrémités d'une même droite, appelée bras de levier.

On nomme *moment d'un couple*, le produit de l'une des composantes de ce couple par son bras de levier.

ARTICLE Ier.

PROPRIÉTÉ GÉNÉRALE DES COUPLES.

Un couple quelconque peut être remplacé par un autre couple situé dans son plan ou dans un plan parallèle, dans une position quelconque, pourvu que :

1° Ce nouveau couple agisse dans le même sens que le premier;

2° Il ait même moment que le premier;

3° Son bras de levier soit invariablement attaché à celui du premier.

§ 1er. — COMPARAISON ENTRE DEUX COUPLES ÉGAUX SITUÉS DANS LE MÊME PLAN ET AGISSANT DANS LE MÊME SENS.

Soient $(P, -P)$, $(P', -P')$ (*fig.* 8) deux couples ayant mêmes forces $P=P'$, mêmes bras de levier $AB=CD$, et même direction.

Par les milieux o, o' des bras de levier AB, CD, nous menons une droite; puis décrivant de ces points comme centres des circonférences sur AB et CD, nous menons les diamètres $A'B'$, $C'D'$ perpendiculaires à OO'. Aux extrémités de ces diamètres, nous appliquons les couples $(P_1, -P_1)$, $(P_1', -P_1')$ dirigés dans le même sens que les couples $(P-P)$, $(P'-P'.)$

1° Les deux couples $(P_1, -P_1)$, $(P_1', -P_1',)$ sont égaux, car si on joint $D'B'$ et $C'A'$ par des droites, ces droites sont des tangentes aux circonférences situées dans les mêmes directions que les forces $P_1, P_1', -P_1, -P_1'$, prises deux à deux. Il en résulte que l'on peut transporter les points d'application des deux forces $P_1 - P_1$ aux deux points D' et C', et alors leur effet est le même que celui des deux forces $P_1' - P_1'$; d'où résulte que l'effet du couple $(P_1', -P_1')$ est le même que celui du couple $(P_1, -P_1)$, et que l'on peut remplacer ces deux couples l'un par l'autre.

Si donc nous démontrons que l'on peut remplacer le couple $(P, -P)$ par le couple $(P_1, -P_1)$, il sera démontré que l'on peut aussi remplacer le couple $(P', -P')$ par le couple $(P_1', -P_1')$, et que par conséquent l'effet du couple $(P', -P')$ situé comme on voudra dans le plan du couple $(P, -P)$, auquel il est égal et dont il a la même direction, est le même que celui de ce couple, et qu'on peut remplacer ces deux couples l'un par l'autre.

2° Pour démontrer que l'effet du couple $(P, -P)$ est le même que celui du couple $(P_1 - P_1)$, appliquons aux extrémités de AB le couple $(P'', -P'')$ égal et opposé au couple

$(P_1, -P_1)$. Ces deux couples étant égaux et opposés se font équilibre, et l'effet des trois couples $(P, -P)$, $(P_1, -P_1)$, $(P'', -P'')$ est le même que celui du couple $(P, -P)$ seul.

Or, les deux forces P et P" se rencontrent en un point E, et ont pour résultante une force dont la direction divise leur angle en deux parties égales, c'est-à-dire passe par le point *o*, car les deux triangles EB'O, EBO sont égaux entre eux.

Par la même raison les deux forces $-P, -P''$ se rencontrent en F et ont pour résultante une force dont la direction est la ligne FO.

Les angles PEP",—PF—P" sont égaux entre eux comme compris entre parallèles; les deux résultantes sont donc égales entre elles.

Enfin la ligne FO est le prolongement de EO, car le triangle AOF est égal au triangle BOE comme triangles rectangles ayant un côté égal OA=OB et un angle AFO moitié de —PE—P" égal à OEB moitié de PEP" égal à —PF—P"; on en conclut que l'angle AO=FBOE; et comme AO est le prolongement de BO, FO est aussi le prolongement de OE; les deux résultantes égales sont alors opposées et se font équilibre. Il ne reste plus alors que le couple $(P_1, -P_1)$ dont l'effet est le même que celui du couple $(P, -P)$.

D'où ce premier principe : *On peut toujours remplacer un couple situé dans un plan, par un autre couple situé dans le même plan, d'une manière quelconque, pourvu que ces deux couples soient égaux et dirigés dans le même sens.*

§ 2. — COMPARAISON ENTRE DEUX COUPLES ÉGAUX SITUÉS DANS DES PLANS PARALLÈLES ET AGISSANT DANS LE MÊME SENS.

Soit $(P, -P)$ (*fig.* 9) un couple situé dans le plan MN, et $(P', -P')$ un second couple égal au premier, dirigé dans le même sens et disposé dans le plan parallèle M'N', de manière que CD soit parallèle à AB, ce qui se peut toujours d'après le paragraphe précédent.

AB et CD étant parallèles sont situées dans le même plan; il en résulte que si l'on mène AD et BC, ces deux lignes se couperont en un point E.

Aux extrémités CD du couple $(P', -P')$ appliquons le couple $(P'', -P'')$ égal et opposé au couple $(P', -P')$; ces deux couples étant égaux et contraires, se font équilibre, et l'effet des trois couples $(P, -P)$, $(P', -P'')$ $(P'', -P')$ est le même que celui du couple $(P, -P)$ seul.

Or les deux forces P et P'', appliquées aux extrémités de la droite AD, ont pour résultante une force égale à leur somme et appliquée au milieu E de cette droite; car les deux triangles ABEECD sont égaux comme ayant un côté égal adjacent à deux angles égaux.

Par la même raison, les deux forces —P et —P'' appliquées aux extrémités de la droite BC, ont pour résultante une force égale à leur somme et appliquée au milieu E de cette droite.

On a donc au point E deux forces égales chacune à 2 P, situées sur la même droite et contraires, qui se font équilibre.

Ces deux forces remplaçant les deux couples (P,—P), (P'',—P''), il reste le couple (P',—P') dont l'effet est le même que celui du couple (P,—P).

D'où le principe : *On peut toujours remplacer un couple situé dans un plan, par un autre couple, situé dans un plan parallèle, égal et dirigé dans le même sens que le premier.*

§ 3. — COMPARAISON ENTRE DEUX COUPLES DONT LES MOMENTS SONT ÉGAUX.

Soient (P—P), (Q,—Q) deux couples situés dans le même plan ou dans des plans parallèles ayant pour bras de levier p et q, tels que les moments de ces couples soient égaux et que l'on ait :

$$Pp = Qq$$

Transportons ces deux couples dans un même plan et sur la même ligne droite (*fig.* 10); prenons AB$=p$ et BC$=q$, et appliquons les couples (P,—P) (Q,—Q) comme le représente la figure.

Aux extrémités de BC appliquons un couple (Q',—Q') égal et contraire au couple (Q—Q). Ces deux couples étant égaux et opposés se font équilibre, et l'effet des trois couples (P,—P), (Q,—Q), (Q',—Q') est le même que celui du couple (P,—P).

Or les deux forces parallèles P et Q' appliquées aux extrémités de la force AC ont pour résultante une force égale à leur somme et dont le point d'application divise AC en parties réciproquement proportionnelles à P et Q'. Mais de l'équation

$$Pp = Qq$$

on tire, en remplaçant Q, p et q par leurs égaux Q', AB, BC :

$$P \times AB = Q' \times BC$$

c'est-à-dire : $P : Q' :: BC : AB$

ce qui indique que le point B est le point d'application de cette résultante.

On a donc au point B, d'une part, trois forces P+Q+Q', et d'autre part deux forces —P—Q' opposées aux trois premières. Retranchant de part et d'autres les égales P+Q', il reste le couple (Q,— Q) dont l'effet est le même que celui du couple (P,—P).

D'où le principe : *On peut toujours remplacer un couple par un autre couple dirigé dans le même sens, situé soit dans le même plan, soit dans un plan parallèle, pourvu que le moment de ce couple soit égal à celui du premier.*

ARTICLE II.

COMPOSITION ET DÉCOMPOSITION DES COUPLES.

§ 1er. — COUPLES SITUÉS DANS UN MÊME PLAN OU DANS DES PLANS PARALLÈLES.

Soient (P, — P) (Q, — Q) deux couples situés dans un même plan ou dans des plans parallèles et ayant pour bras de levier p et q.

Soit (R, — R) un troisième couple ayant, avec le bras de levier p', même moment que le couple (P, — P), et, avec le bras de levier q', même moment que le couple (Q, — Q), on aura :

$$Rp' = Pp$$
$$Rq' = Qq$$

d'où : $$Rp' + Rq' = Pp + Qq$$

et $$R(p' + q') = Pp + Qq$$

c'est-à-dire que *pour composer en un seul couple, deux couples situés dans un même plan ou dans des plans parallèles, il suffit de trouver un troisième couple dont le moment soit égal à la somme ou à la différence des moments des couples composants, suivant que ces deux couples agissent dans le même sens ou en sens contraire.*

Il résulte de là, que si on a un nombre quelconque de couples (P, — P), (P', — P'), (P", — P") etc., situés dans le même plan ou dans des plans parallèles, on peut toujours les remplacer par un seul et même couple situé dans l'un des plans, ayant son moment égal à la somme des moments des couples composants.

Il est une autre méthode de compositions de couples situés

dans un même plan, qui consiste à remplacer chacun des couples composants, par un autre ayant un bras de levier constant, de la manière suivante :

Au lieu de Pp mettons $P' \times r$.
Au lieu de Qq mettons $Q' \times r$.

Il est clair alors que s'ils agissent dans le même sens, le couple résultant a pour force $P' + Q'$, et pour moment $(P' + Q')\, r = Pp + Qq$.

De même si on a un nombre quelconque de couples situés dans le même plan ou dans des plans différents.

§ 2. — PARALLÉLOGRAMME DES COUPLES.

Soient MN, M'N' (*fig.* 10 *bis*) deux plans faisant entre eux un angle quelconque et contenant chacun un couple (M, — M), (N, — N).

Sur l'intersection CD de ces deux plans, nous prenons une longueur AB arbitraire, et nous y appliquons, dans chacun des plans donnés, un couple tel que l'on ait :

$$P \times AB = Mm$$
$$Q \times AB = Nn$$

Les moments des couples (P, — P), (Q, — Q) étant égaux à ceux des couples (M, — M), (N,—N), on peut les remplacer les uns par les autres, et réciproquement; d'où résulte que le couple résultant des deux couples (P, — P), (Q, — Q) est le même que celui résultant des deux couples (M, — M), (N,—N).

Or, les deux forces P et Q appliquées au point B de la droite AB, et perpendiculaires à cette droite, ont pour résultante une force R dirigée suivant la diagonale du parallélogramme construit sur P et Q et située dans un plan perpendiculaire à AB.

Par la même raison, les deux forces —P, — Q appliquées au point A, ont pour résultante une force R' perpendiculaire à AB. Or, R' est égale à — R, car :

Les forces P et Q étant égales aux forces — P et — Q, et également inclinées entre elles, la résultante R' est égale à la résultante R ; de plus, si on fait passer deux plans, l'un par AB et R, l'autre par AB et R', ces deux plans n'en font qu'un seul, car les forces Q et R d'une part, et — Q et R' d'autre part, mesurent les angles opposés de ces plans ; or, ces angles sont égaux.

Les deux couples (P, — P), (Q, — Q) ont donc pour couple

résultant le couple (R, — R) ayant même bras de levier, et pour force, la diagonale du parallélogramme construit sur P et Q.

SECTION II.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES FORCES DIRIGÉES D'UNE MANIÈRE QUELCONQUE DANS L'ESPACE.

ARTICLE Ier.

RÉSULTANTE D'UN NOMBRE QUELCONQUE DE FORCES DIRIGÉES D'UNE MANIÈRE QUELCONQUE DANS L'ESPACE.

Soient P, P', P'', etc. (*fig.* 11), un nombre quelconque de forces dirigées comme on voudra dans l'espace. Nous prenons deux forces P et P'; par le point B de P', nous menons une parallèle à P, et nous appliquons sur cette droite deux forces P_1, — P_1 égales à P et contraires entre elles. De plus, du point B nous abaissons BA perpendiculaire sur P, et nous remplaçons ainsi la force P par la force P_1 appliquée en B, et le couple (P, — P_1) ayant pour bras de levier AB.

Les deux forces P' et P_1, appliquées au point B, ont pour résultante la diagonale R du parallélogramme construit sur les longueurs exprimant leur valeur.

Les deux forces P et P' se trouvent donc ainsi remplacées par le couple (P, — P_1) et la force R.

Ce que nous venons de faire pour P et P', on le fait pour R et P'' de la manière suivante :

Par le point B on mène une parallèle à P'', et on remplace cette force par une autre appliquée au point B et un couple (P'', — P'') ayant son bras de levier partant du point B. Les deux forces P'' et R appliquées au point B, sont remplacées par une seule R', diagonale du parallèlogramme construit sur les longueurs exprimant leur valeur. Les deux couples (P, — P), (P'', — P'') situés dans des plans qui se coupent sont remplacés par un couple unique comme il a été dit ci-dessus.

Il résulte de là que, *quel que soit le nombre des forces* P, P', P'', *etc., on peut toujours les remplacer par une force unique appliquée en un point de la direction de l'une d'elles, et un couple dont le bras de levier passe par ce point.*

ARTICLE II.

ÉQUILIBRE DES FORCES DIRIGÉES D'UNE MANIÈRE QUELCONQUE DANS L'ESPACE.

Par la raison que, un nombre quelconque de forces diri-

gées, comme on voudra, dans l'espace, se compose toujours en une force unique et un couple unique, il suffit, pour faire équilibre à ces forces, d'appliquer une force et un couple égaux et directement opposés à la force et au couple composant des forces données.

CHAPITRE III.

THÉORIE DES MOMENTS.

On nomme moment d'une force, le produit de cette force par la distance de son point d'application à une droite ou à un plan déterminés.

Propriété générale des moments.

Le moment de la résultante est égal à la somme des moments des composantes.

§ 1er. — FORCES PARALLÈLES.

Soient P, Q (*fig.* 15) deux forces parallèles appliquées aux extrémités d'une droite AB; R leur résultante, et MN un plan pris dans l'espace.

Des points A, B, C, abaissons les perpendiculaires AA', BB', CC' sur ce plan; les moments des trois forces P, Q, R sont alors :

$$P \times AA', \ Q \times BB', R \times CC'$$

Les trois droites AA', BB', CC', étant des perpendiculaires abaissées de différents points d'une droite sur un plan, sont situées dans un même plan; si donc on mène par le point C une parallèle à l'intersection A'B' de ce plan avec le plan MN, elle rencontre AA' en D, et BB' en E.

$$AD = A'D - AA' = CC' - AA' \text{ et } AA' = CC' - AD$$
$$BE = BB' - B'E = BB' - CC' \text{ et } BB' = CC' + BE$$

d'où :
$$P \times AA' = P \times CC' - P \times AD$$
$$Q \times BB' = Q \times CC' + Q \times BE$$

Ajoutant ces deux équations membre à membre, il vient :

$$P \times AA' + Q \times BB' = (P + Q)\,CC' - P \times AD + Q \times BE$$
$$= R \times CC' - P \times AD + Q \times BE$$

car :
$$P + Q = R$$

Mais les deux triangles semblables ACD, CEB donnent :

$$BE : AD :: CB : AC$$

On a par hypothèse : $P : Q :: CB : AC$

donc : $P : Q :: BE : AD$

et $P \times AD = Q \times BE$

Effectuant les réductions dans l'équation ci-dessus, il vient :

$$P \times AA' + Q \times BB' = R \times CC'$$

On déduit de là que, si on a tant de forces parallèles que l'on voudra P, P', P'', etc., appliquées en différents points d'un même corps, dont les distances à un même plan sont *p*, *p'*, *p''*, etc., le moment de la résultante R de ces forces est égal à la somme des moments des composantes, ce qui donne :

$$Rr = Pp + P'p' + P''p'' + \text{etc.}$$

$$\text{et } r = \frac{Pp + P'p' + P''p'' + \text{etc.}}{P + P' + P'' + \text{etc.}}$$

§ 2. — FORCES CONCOURANTES.

Soient P, Q (*fig.* 16) deux forces concourant en un même point *o*, et ayant pour résultante R ; soit M un second point situé dans le plan de ces forces, et par rapport auquel on désire prendre leurs moments.

Du point M, abaissons les perpendiculaires M*p*, M*q*, M*r*, sur leurs directions, et alors les moments de ces forces sont :

$$P \times Mp,\ Q \times Mq,\ R \times Mr$$

Par le point O, menons ON perpendiculaire à MO, et décomposons chacune des forces P, Q, R en deux autres dirigées l'une suivant OM, et l'autre suivant ON. Soient α, β, γ les angles de P, Q, R avec OM, on a :

1° Suivant OM . . . . . . $P \cos. \alpha$
$Q \cos. \beta$
$R \cos. \gamma$

2° Suivant ON . . . . . . $P \sin. \alpha$
$Q \sin. \beta$
$R \sin. \gamma$

La force R étant la résultante des deux forces P et Q, on doit avoir :

$$R \cos. \gamma = P \cos. \alpha + Q \cos. \beta$$
$$R \sin. \gamma = P \sin. \alpha + Q \sin. \beta$$

Mais dans le triangle MOp, on a :

$$\cos.\alpha = \frac{Op}{MO}$$

$$\sin.\alpha = \frac{Mp}{MO}$$

Dans le triangle MOq, on a :

$$\cos.\beta = \frac{Oq}{MO}$$

$$\sin.\beta = \frac{Mq}{MO}$$

Dans le triangle MOr on a :

$$\cos.\gamma = \frac{Or}{MO}$$

$$\sin.\gamma = \frac{Mr}{MO}$$

Remplaçant dans la seconde des équations ci-dessus, les sinus par leurs valeurs, il vient :

$$\frac{R \times Or}{OM} = \frac{P \times Op}{MO} + \frac{Q \times Oq}{MO}$$

et $$R \times Or = P \times Op + Q \times Oq.$$

On déduit de là que si, ayant un nombre quelconque de forces concourant en un même point P P' P'', etc., on abaisse d'un point pris dans l'espace, des perpendiculaires p, p', p'', etc., sur les directions de ces forces, on aura :

$$Rr = Pp + Pp' + P''p'' + \text{etc.}$$

CHAPITRE IV.

CENTRES DE GRAVITÉ.

On nomme *centre de gravité d'un corps, le point d'application de la résultante de toutes les actions de la pesanteur sur les molécules de ce corps, dans quelque position qu'il se trouve.*

Cette définition du centre de gravité exige une démonstra-

tion, à savoir que : *La résultante d'un nombre quelconque de forces égales et parallèles appliquées en des points déterminés, passe toujours par un même point, quelque direction que l'on donne à l'ensemble de ces forces.*

Or, pour cela, il suffit de remarquer que, quelles que soient les directions des forces parallèles, appliquées en différents points liés entre eux d'une manière invariable, le point d'application de la résultante s'obtient eu égard seulement aux distances qui existent entre ces points et les valeurs des composantes entre elles, et non pas eu égard à leur direction. Il résulte de là que, si on prend les résultantes de plusieurs forces parallèles agissant sur un même corps, dans diverses positions, ces résultantes devront toutes venir se couper en un même point qui est le centre de gravité de ce corps.

En statique, le *point* remplace la molécule. Le centre de gravité d'un point est ce *point* lui-même.

ARTICLE Ier.

CENTRES DE GRAVITÉ DES LIGNES.

§ 1er. — CENTRE DE GRAVITÉ D'UNE LIGNE DROITE.

Une ligne droite est une série non interrompue de points situés à égale distance les uns des autres. L'action de la pesanteur, sur cette droite, se compose d'une série de forces parallèles appliquées uniformément aux différents points de la droite, et dont la résultante a son point d'application au milieu de cette droite.

Donc : *le centre de gravité d'une droite est situé en son milieu.*

§ 2. — CENTRE DE GRAVITÉ DU PÉRIMÈTRE D'UN TRIANGLE.

Soient ABC (*fig.* 12) un triangle; D, E, F les milieux ou centres de gravité de ses trois côtés. Pour trouver le centre de gravité du système total, nous joignons les deux points DE par une droite, et remarquons que, puisque les actions de la pesanteur sur les droites sont proportionnelles aux nombres de points qu'elles contiennent, les résultantes de ces actions appliquées aux points D et E doivent être entre elles comme les droites AB, BC. Considérant ces résultantes comme deux forces appliquées aux extrémités de la droite DE, nous obtenons le point d'application g de leur résultante, en divisant DE en parties réciproquement proportionnelles à AB et BC, et nous avons :

$$Dg : gE :: BC : AB$$

Joignant alors gF, nous obtenons le centre de gravité G du périmètre total, en posant :

$$gG : GF :: AB + BC : AC.$$

Mais si nous menons les droites DF, FE, le triangle intérieur DEF est semblable au triangle extérieur ABC, comme ayant les côtés parallèles ; d'où on tire :

$$DF : FE :: BC : AB$$

Comparant cette proportion avec la première :

$$Dg : GE :: BC : AB$$

nous voyons que les deux seconds membres sont les mêmes, et que par conséquent les deux premiers sont en proportion ; ce qui donne :

$$DF : FE :: Dg : gE$$

La ligne Fg divisant la base du triangle DEF en deux parties proportionnelles aux deux autres côtés, partage l'angle F en deux parties égales.

On démontrera de même que le centre de gravité est situé sur la droite qui partage l'angle E en deux parties égales ; il est donc situé à l'intersection, c'est-à-dire au centre du cercle inscrit dans le triangle DEF.

Donc : *le centre de gravité du périmètre d'un triangle est situé au centre du cercle inscrit dans le triangle ayant pour sommet les milieux des côtés du triangle donné.*

§ 3. — CENTRE DE GRAVITÉ D'UN ARC DE CERCLE.

Soit ABCDE (*fig.* 13) une portion de polygone régulier, ayant son centre au point O.

Considérons le côté BC, et soit I son milieu ; abaissons du point I une perpendiculaire sur le diamètre quelconque A'E', et proposons-nous d'exprimer la distance IH en fonction de quantités connues, telles que le rayon OI et le côté BC.

Pour cela, nous menons BK parallèle, et BB', CC' perpendiculaire à A'E'.

Les deux triangles OIH, BKC sont semblables, comme ayant les côtés perpendiculaires, et on a :

$$OI : BC :: IH : BK$$

d'où : $$OI \times BK = BC \times IH$$

Remplaçant BK par son égal $B'C'$, il vient :

$$OI \times B'C' = BC \times IH$$

On trouve de même pour un autre côté AB :

$$OI \times A'B' = AB \times I'H'$$

et pour la somme des côtés :

$$OI\,(A'B' + B'C' + \text{etc.}) = AB \times I'H' + BC \times IH + \text{etc.}$$

c'est-à-dire $OI \times A'E' = AB \times I'H' + BC \times IH + \text{etc.}$

Soit G le centre de gravité de la portion de polygone AB CDE, on doit avoir, d'après la théorie des moments :

$$GG' \times ABCDE = AB \times I'H' + BC \times IH + \text{etc.}$$

donc : $$GG' \times ABCDE = OI \times A'E'$$

Soit ABCDE une portion de polygone d'un nombre infini de côtés, c'est-à-dire un arc de cercle a (*fig.* 4); appelons r le rayon du cercle inscrit, il vient :

$$GG' = \frac{r}{a}\, A'E'$$

Soit la corde $AE = c$ parallèle à $A'E'$, le point G' se confond avec le point O, $A'E' = AE = C$, et on a :

$$OG = \frac{r}{a}\, c$$

ou : $$a : c :: r : OG.$$

L'arc est à la corde, comme le rayon est à la distance du centre de figure au centre de gravité.

ARTICLE II.

CENTRES DE GRAVITÉ DES SURFACES.

§ 1er. CENTRE DE GRAVITÉ DU TRIANGLE.

Soit ABC (*fig.* 17) un triangle quelconque. Imaginons sa surface comme composée d'une infinité de droites parallèles à la base AB ; les centres de gravité de ces droites sont tous situés en leurs milieux. Or, le lieu géométrique de tous ces milieux est précisément la droite CD qui joint le sommet au milieu de la base.

En effet, si on considère une quelconque de ces droites, ab par exemple, les deux triangles ACD, aCd sont semblables, et on a :

$$aC : AC :: ad : AD$$

On a aussi : $aC : AC :: ab : AB$
d'où : $ad : ab :: AD : AB$
et comme $AD = \frac{1}{2} AB$, il vient $ad = \frac{1}{2} ab$.

Le centre de gravité de toutes les droites composant le triangle étant situé sur CD, le centre de gravité de ce triangle y est aussi.

On démontre de même que ce centre de gravité est situé sur AE qui joint le sommet A au milieu de la base CB.

Le centre de gravité du triangle ABC se trouvant à la fois sur AE et sur CD, est à leur intersection G.

Pour trouver la position du point G, nous joignons DE. La ligne DE joignant les milieux des deux côtés AB, BC est parallèle à la base AC.

On a donc : $DE : AC :: DB : AB$
et comme $DB = \frac{1}{2} AB$, il vient $DE = \frac{1}{2} AC$

Les deux triangles ABC, DGE sont semblables comme ayant les trois angles égaux, et on a :

$$GD : GC :: DE : AC$$

et comme $DE = \frac{1}{2} AC$, il vient $GD = \frac{1}{2} GC = \frac{1}{3} GD$.

Ce qui indique que *le centre de gravité d'un triangle est situé sur la droite qui joint son sommet au milieu de la base à deux tiers à partir du sommet et à un tiers à partir de la base.*

§ 2. — CENTRE DE GRAVITÉ DU TRAPÈZE.

Soit ABCD (*fig.* 18) un trapèze. Menons la diagonale AC; nous le décomposons en deux triangles ABC, ACD dont les centres de gravité $g g'$ sont situés sur les droites CE, AF qui joignent les sommets A, C aux milieux des bases parallèles AB, CD. Si nous joignons gg', le centre de gravité du trapèze se trouve sur cette droite.

Menons maintenant la droite FE qui joint les milieux des bases parallèles, et supposons, comme pour le triangle, la surface trapézoïdale composée d'une infinité de droites parallèles aux bases, dont les centres de gravité se trouvent sur EF. Alors le centre de gravité du trapèze se trouve aussi sur cette droite. Se trouvant sur gg' et sur EF, il est situé à leur intersection G.

Pour trouver la position du point G, nous abaissons les perpendiculaires gp, $g'p'$, GP, Ff, CK sur la base, et faisant Ff

$= h$ nous avons :

1° $EC : Eg :: h : gp = h \frac{Eg}{EC}$

2° $AF : Ag' :: h : g'p' = h \frac{Ag'}{AF}$

D'après la théorie des moments, on a :

$(\text{Surf. } ABCD) \times GP = (\text{surf. } ACB) \times gp + (\text{surf. } ACD) \times g'p'$

Faisant : Surf. $ABCD = T$ $GP = X$
Surf. $ACB = t$ $gp = x$
Surf. $ACD = t'$ $g'p' = x'$

il vient : $TX = tx + t'x'$

Remplaçant x et x' par leurs valeurs tirées précédemment, il vient :

$$TX = th \frac{Eg}{EC} + t'h \frac{Ag'}{AF}$$

Or : $Eg = \frac{1}{3} EC, \; Ag' = \frac{2}{3} AF$

$$TX = \frac{1}{3} th + \frac{2}{3} t'h = h \left(\frac{1}{3} t + \frac{2}{3} t'\right)$$

Remplaçant T par $t + t'$:

$$(t + t') X = h \left(\frac{1}{3} t + \frac{2}{3} t'\right)$$

$$X = h \frac{\frac{1}{3} t + \frac{2}{3} t'}{t + t'}$$

Soit $AB = B$, $CD = b$, on a :

$$t = \frac{1}{2} B \times h \qquad t' = \frac{1}{2} b \times h$$

d'où : $X = h \frac{\frac{1}{6} Bh + \frac{1}{3} bh}{\frac{1}{2} Bh + \frac{1}{2} bh} = h \frac{\frac{1}{3} B + \frac{2}{3} b}{B + b}$

Dans le triangle EFf, on a :

$$FE : GE :: Ff : GP$$

$$:: 1 : \frac{\frac{1}{3} B + \frac{2}{3} b}{B + b}$$

et $GE = FE \frac{B + 2b}{3(B + b)}$

§ 3. — CENTRE DE GRAVITÉ DU SECTEUR CIRCULAIRE.

Soit O A C B (*fig.* 19) un secteur circulaire : considérons l'arc A C B comme portion d'un polygone d'un nombre infini de côtés, et menons des rayons aux sommets ; nous décomposons ainsi le secteur en un nombre infini de triangles ayant tous leurs sommets en *o*.

Or les centres de gravité de ces triangles sont tous situés sur l'arc de cercle A' C' B' décrit du point *o* comme centre avec O B' = 2/3 A B pour rayon. Il résulte de là que le centre de gravité du secteur est le même que celui de l'arc A' C' B'.

Soit G le centre de gravité de l'arc A' C' B', nous avons :

$$\text{Arc } A'C'B' : \text{corde } A'B' :: B'O : OG$$

Remarquant que l'on a : $A'C'B' = {}^2/_3\, ACB = {}^2/_3\, a$

$A'B' = {}^2/_3\, AB = {}^2/_3\, c$

$B'O = {}^2/_3\, OB = {}^2/_3\, r$

il vient : $\quad {}^2/_3\, a : {}^2/_3\, c :: {}^2/_3\, r : OG$

et : $\quad OG = {}^2/_3\, \dfrac{cr}{a} = \dfrac{2cr}{3a}$

§ 4. — CENTRE DE GRAVITÉ DU SEGMENT CIRCULAIRE.

Soit A C B D (*fig.* 20) un segment circulaire.

Ce segment est la différence entre le secteur A C B O et le triangle O A B. Soient G, G', G'' les centres de gravité du secteur, du triangle et du segment. Si nous prenons les moments par rapport au centre *o*, il vient :

Secteur $ACBO \times OG =$ triangle $AOB \times OG' +$ segment $ACBD \times OG''$

Faisant $\quad ACBO = S \qquad ACB = a$

$AOB = T \qquad AB = c$

$ACBD = \lambda \qquad AO = r$

$OG'' = x$

il vient : $\quad \lambda x = S \times OG - T \times OG'$

on a : $\quad S = {}^1/_2\, r \times a$

$$T = {}^1/_2\, c \times OD = {}^1/_2\, c \sqrt{r^2 - \frac{c^2}{4}}$$

$$\lambda = S - T = {}^1/_2\left(ra - c\sqrt{r^2 - \frac{c^2}{4}}\right)$$

$$OG = \frac{2cr}{3a}.$$

$$OG' = {}^2/_3\,OD = {}^2/_3\sqrt{r^2 - \frac{c^2}{4}}$$

d'où :

$$X = \frac{{}^1/_2\,ra \times \frac{2cr}{3a} - {}^1/_2\,c\sqrt{r^2 - \frac{c^2}{4}} \times {}^2/_3\sqrt{r^2 - \frac{c^2}{4}}}{{}^1/_2\left(ra - c\sqrt{r^2 - \frac{c^2}{4}}\right)}$$

Effectuant les réductions :

$$X = \frac{\frac{cr^2}{3} - \frac{cr^2}{3} + {}^1/_{12}\,c^4}{{}^1/_2\left(ra - c\sqrt{r^2 - \frac{c^2}{4}}\right)}$$

$$= \frac{c^4}{6\left(ra - c\sqrt{r^2 - \frac{c^2}{4}}\right)} \text{ ou } \frac{c^4}{12\,\lambda}$$

§ 5. — CENTRE DE GRAVITÉ DE LA ZONE SPHÉRIQUE.

Soit ACB (*fig.* 21) une calotte sphérique ayant pour hauteur DC. Si par tous les points de DC nous menons des plans perpendiculaires au rayon OC, nous décomposons la surface de la zône en une infinité de circonférences qui ont toutes leur centre de gravité sur la droite CD. Le centre de gravité de la zône est donc situé sur la droite CD.

Remarquant maintenant que la surface de la zône est égale à la circonférence d'un grand cercle multipliée par sa hauteur, le plan mené par le point G milieu de CD divise la zône ACBD en deux parties égales, car les deux zônes composantes,

ayant même hauteur $\frac{1}{2}$ CD, sont équivalentes. Il résulte de là que le centre de gravité de la zône totale doit se trouver dans ce plan. Mais il est déjà sur C D, il est donc à l'intersection au point G milieu de CD, et on a, en faisant $CO = r$, $OD = a$:

$$GO = r' - \frac{DC}{2} = r - \left(\frac{r-a}{2}\right) = \frac{r+a}{2}$$

ARTICLE II.

CENTRES DE GRAVITÉ DES SOLIDES.

§ 1er. — CENTRE DE GRAVITÉ DE LA PYRAMIDE TRIANGULAIRE.

Soit SABC (*fig.* 22) une pyramide triangulaire. Menons la ligne CD du point C au milieu de la base AD du triangle ACB, et joignons le sommet S de la pyramide au centre de gravité g de ce triangle.

Si nous coupons la pyramide par une infinité de plans parallèles à la base ABC, elle se trouve composée d'une infinité de triangles semblables au triangle ABC et ayant par conséquent leurs centres de gravité sur la ligne Sg. Le centre de gravité du système total est donc sur Sg.

Joignons SD, la ligne Sg se trouve dans le triangle SCD. Joignons le sommet C au point g' centre de gravité du triangle ASB; le centre de gravité de la pyramide est aussi sur Cg'.

Le centre de gravité cherché, se trouvant à la fois sur Sg et Cg', est l'intersection G de ces deux droites.

Pour trouver la position du point G, joignons gg'; les deux triangles gg'G, GSC sont semblables, et on a :

$$gG : SG :: gg' : SC$$

Mais on a aussi :

$$gg' : CS :: Dg : DC.$$

Or, $\quad Dg = \frac{1}{3}\,DC$; donc $gg' = \frac{1}{3}\,CS$

d'où : $\quad gG = \frac{1}{3}\,SG = \frac{1}{4}\,Sg.$

D'où l'énoncé : *Le centre de gravité de la pyramide triangulaire est situé sur la droite qui joint son sommet au centre de gravité de la base, à trois quarts à partir du sommet, et à un quart à partir de la base.*

§ 2. — CENTRE DE GRAVITÉ DU SECTEUR SPHÉRIQUE.

Soit OACB (*fig.* 23) un secteur sphérique. Considérons la zône ACB qui lui sert de base comme composée d'une infinité de surfaces planes infiniment petites, et joignons tous les sommets de ces surfaces au centre *o* du secteur sphérique, nous décomposons ainsi ce dernier en une infinité de petites pyramides dont les centres de gravité sont tous situés sur la zône A'C'B'D', décrite du point *o* comme centre avec O A' = 3/4 de OA pour rayon; le centre de gravité du secteur est donc le même que celui de la zône A'C'B'D', lequel est situé en G, milieu de D'C', pour lequel on a :

$$OG = \tfrac{1}{2}(OA' + OD')$$

Faisant : $OD = a$

$OA = r$

on a : $OA' = \tfrac{3}{4}\,r$

$OD' = \tfrac{3}{4}\,a$

d'où : $OG = \tfrac{1}{2}\left(\tfrac{3}{4}\,r + \tfrac{3}{4}\,a\right)$

et : $OG = \tfrac{3}{8}\,(r + a).$

§ 3. — CENTRE DE GRAVITÉ DU SEGMENT SPÉRIQUE.

Soit ABCD (*fig.* 24) un segment sphérique. Il est égal à la différence entre le secteur sphérique OACD et le cône OAB,

Prenant les moments et désignant par :

λ le volume du segment;

S celui du secteur;

C celui du cône;

il vient : $\lambda \times OG'' = S \times OG - C \times OG'$

Or, on a : $S = \tfrac{2}{3}\pi\,\overline{OA}^2 \times DC$

$C = \tfrac{1}{3}\pi\,\overline{DA}^2 \times OD$

$OG = \tfrac{3}{8}\,(OA + OD)$

$OG' = \tfrac{3}{4}\,OD$ comme pour la pyramide triangulaire.

Faisant : $OG'' = x$

$OD = a$

$OA = r$

$AB = c$

il vient :

$$\lambda x = \tfrac{2}{3}\pi\, r^2 (r - a)\, \tfrac{3}{8}\,(r + a) - \tfrac{1}{3}\pi\,(r^2 - a^2)\, a \times \tfrac{3}{4}\,a$$

$$= \tfrac{1}{4}\pi\, r^2 (r^2 - a^2) - \tfrac{1}{4}\pi\, a^2\,(r^2 - a^2)$$

$$= \tfrac{1}{4}\pi\,(r^2 - a^2)$$

Or $r^2 - a^2 = \overline{AD}^2 = \frac{c^2}{4}$ et $(r^2 - a^2)^2 = \frac{c^4}{16}$, on a donc :

$$\lambda x = {}^1\!/_4 \pi \frac{c^4}{16} = \frac{\pi c^4}{64}$$

d'où :

$$x = \frac{\pi c^4}{64 \lambda}$$

On a d'autre part :

$$\lambda = {}^2\!/_3 \pi r^2 (r - a) - {}^1\!/_3 \pi (r^2 - a^2) a$$
$$= {}^1\!/_3 \pi (2 r^3 + a^3) - \pi a r^2.$$

On peut remplacer λ par cette valeur.

CHAPITRE V.

MACHINES.

Les machines sont des appareils destinés à transmettre l'action des forces.

On considère deux espèces de machines, savoir ;

Les machines simples;

Les machines composées.

Les machines simples sont au nombre de trois principales, savoir :

Le *levier;*

Le *treuil ;*

Le plan *incliné ;*

dont dérivent directement :

La balance ;

La romaine ;

La balance-bascule ;

Le peson ;

La poulie ;

La vis ;

Le coin.

Le nombre des machines composées est indéfini ; les principales sont :

Le polygone funiculaire ;

Les poulies et les moufles ;

Les treuils et les roues dentées ;

Le cric ;

La vis sans fin.

ARTICLE Ier.

MACHINES SIMPLES.

§ 1er. — LE LEVIER ET SES DÉRIVÉS.

Soit CD (*fig.* 25) une barre de forme quelconque, ayant la faculté d'osciller autour du point fixe O.

Soient P et Q deux forces appliquées à cette barre, on demande les conditions d'équilibre entre ces forces.

Du point O abaissons OA et OB perpendiculaires sur P et sur Q, et menons par ce point deux parallèles, l'une à PA, l'autre à QB.

Aux extrémités de la parallèle à PA appliquons deux forces P',—P' égales à P et contraires; leur effet est nul, et alors on peut remplacer la force P par le couple (P,—P') ayant pour bras de levier OA, et la force P' appliquée au point fixe O.

Par la même raison, on peut remplacer la force Q par le couple (Q,—Q') ayant pour bras de levier OB, et la force Q' appliquée au point fixe O.

Les deux forces P' et Q' sont détruites par la résistance du point O, et alors les conditions d'équilibre des deux forces P et Q se trouvent ramenées à celles des deux couples (P,— P') (Q,—Q').

Or, pour que deux couples se fassent équilibre, il faut que :

1° Ces deux couples soient situés dans le même plan ou dans des plans parallèles;

2° Qu'ils agissent en sens contraire et aient leurs moments égaux.

D'où nous concluons :

Les deux forces P et Q seront en équilibre si :

1° *Elles sont situées dans le même plan ou dans des plans parallèles;*

2° *Elles sont dirigées dans des sens opposés et sont liées entre elles par la relation :*

$$P \times OA = Q \times OB$$

c'est-à-dire : $P : Q :: OB : OA.$

La Balance.

La balance (*fig.* 26) est un levier dont les bras de levier sont égaux; on nomme ce levier *fléau*.

Dans ce cas, il faut pour l'équilibre :

$$P = Q$$

Le fléau étant donc d'un certain poids, il faut, pour qu'il reste horizontal, que son centre de gravité soit situé sur la verticale passant par son centre O.

Or, ce centre de gravité peut se trouver dans trois positions, sur cette verticale :

1° Au-dessus de O;

2° En O;

3° Au-dessous de O.

1° Lorsqu'il est au-dessus de O (*fig.* 27), le fléau, *horizontal*, est dit en équilibre instable, car pour peu qu'il prenne une inclinaison A B, par exemple, le centre de gravité G se trouvant dehors de la verticale, le poids p du fléau, rapporté à ce point, vient s'ajouter au poids P, et la condition d'équilibre change, car il faut alors :

$$P \times AA' + p \times ao = Q \times BB'$$

2° Lorsque le centre de gravité du fléau est au point O, les deux poids P et Q sont toujours en équilibre, quelle que soit la position du fléau.

3° Lorsque le centre de gravité G du fléau est situé au-dessous du point O. Alors l'inverse du premier cas a lieu, c'est-à-dire que le poids p du fléau vient s'ajouter au poids Q et tend à ramener le fléau dans la position horizontale qui n'est atteinte rigoureusement que quand P est égal à Q.

Cette dernière position du centre de gravité du fléau est celle que l'on adopte pour la balance, comme étant la seule qui permette de mesurer promptement et exactement les poids.

La Romaine.

La romaine (*fig.* 28) est, comme la balance, un appareil destiné à mesurer des poids; mais elle diffère de cette dernière en ce que le poids de comparaison est fixe, tandis que le bras de levier de ce poids est variable.

Pour l'équilibre il faut toujours

$$P \times OA = Q \times OB$$

Le fléau étant en équilibre horizontal comme précédemment, on marque sur la portion oc les points d'application du poids P correspondant à diverses valeurs de Q.

Dans le cas où le centre de gravité du fléau se trouve entre les deux points O et C, alors il existe une valeur *minima* pour

Q au-dessous de laquelle il n'est pas possible de peser ; cette valeur est celle qui fait équilibre au fléau dans la position horizontale.

La Balance-Bascule.

La balance-bascule (*fig.* 30 et 29) consiste en un plateau *ab* (*fig.* 30) supporté en deux points *a* et *b*, lesquels sont, l'un *a* monté sur un couteau F pouvant osciller autour du point G, l'autre *b* suspendu à la tige *b*C dont le point C peut osciller autour du point A.

DA est un fléau divisé en trois parties DC, CA, BA. Au point A est un plateau de balance dans lequel on met un poids comme P, et au point D est une seconde tige, semblable à *cb*, supportant le levier GE par le point F.

B et G sont les deux seuls centres de rotation.

Q placé sur *ab* est le corps dont on veut avoir le poids.

Soient p et p' les charges de Q sur les points d'appui *a* et *b*; p se convertit en une autre p'' appliquée au point D du fléau, et on a pour l'équilibre :

1° $$p \times GF = p'' \times GE$$

$$p'' = p \frac{GF}{GE}$$

2° $$p'' \times DB + p' \times CB = P \times BA.$$

Remplaçant p'' par sa valeur :

$$p \frac{GF}{GE} \times DB + p' \times CB = P \times BA$$

On a de plus : $Q = P + p'$

Dans les balances bascules ordinaires, on fait :

$$Q = 10\ P.$$

De plus, on dispose les leviers pour que le tablier *ab* lève toujours horizontalement. A cet effet, on établit entre les deux bras de levier GE et GF le même rapport que celui qui existe entre les deux bras de levier DB et CB.

On a alors :

$$\frac{GF}{GE} = \frac{CB}{DB}$$

d'où : $$p \times \frac{CB}{DB} \times DB + p' \times CB = P \times AB$$

et : $$CB\,(p + p') = P \times AB$$
$$CB \times Q = P \times AB.$$

Ce qui indique que, quelles que soient les valeurs de p et p', pourvu que leur somme soit égale à Q, il y aura toujours équilibre avec P; on peut donc poser le poids Q en un point quelconque du plateau ab.

De la dernière équation, on tire :

$$Q = P\,\frac{AB}{CB}$$

Faisant $Q = 10\,P$, il vient $AB = 10\,CB$.

On peut donner à DB telle valeur que l'on veut par rapport à CB. Généralement, cette valeur dépend de la position du couteau a sur le plateau, lequel doit être aussi près que possible du bord, afin que, quand on place un fardeau sur le plateau, il ne se dérange pas de sa position naturelle en faisant la bascule.

Si, par exemple, on prend $GF = 1/5\ GE$, il vient :

$$DB = 5\,CB.$$

On emploie, pour peser les voitures, le pont à bascule représenté *fig.* 31, 32, *Pl.* V, et *fig.* 33, *Pl.* VI, qui diffère de la balance à bascule en ce qu'il y a deux leviers entre la charge et le poids, au lieu d'un seul, savoir :

Le levier AB (*Pl.* VI *fig.* 33) ayant son point fixé en B et dans lequel les efforts contraires sont en A et en C et donnent :

$$P \times AB = P' \times CB$$

Les deux leviers HI (*Pl.* V, *fig.* 31) fonctionnant comme un seul et donnant :

$$P' \times N'K' = Q \times G'K'$$

d'où : $$P \times AB \times N'K' = Q \times CB \times G'K'.$$

Faisant $AB = 10\,CB$ et $N'K' = 10\,G'K'$,

il vient : $$P \times 100 = Q,$$

d'où : $$P = \frac{Q}{100},$$

Le Peson.

Soit O (*Pl.* VI, *fig.* 34) le centre de rotation de deux verges AO, CF solidaires l'une de l'autre et perpendiculaires entre elles.

Soit A le centre d'une boule suspendue à l'extrémité de la

verge AO, et pesant un poids P. Il est évident que si aucune force ne la sollicite, la verge AO prend la direction de la verticale OE ; mais si au point C on applique une force Q, alors le point A s'éloigne du point E en décrivant un arc de cercle autour du point O. Abaissons les perpendiculaires AB, CD sur la verticale OE.

D'après les conditions d'équilibre du levier, il est évident que les deux forces P et Q seront en équilibre, si on a :

$$P \times AB = Q \times CD$$

d'où :
$$Q = P\,\frac{AB}{CD}$$

Comme, pour différentes valeurs de Q, la position du point A change, on peut écrire, sur l'arc EE', les différentes valeurs de Q correspondantes aux diverses positions de P, et alors, sans poids aucun, on peut peser toute espèce d'objets suspendus au point C.

Pour rendre la graduation de l'arc EE' facile, nous remarquons que, dans les triangles rectangles semblables AOB, DOC, on a :

$$AB = AO \sin. AOB = AO \sin. \alpha$$
$$DC = OC \cos. \alpha$$

d'où :
$$P \times AO \sin. \alpha = Q \times OC \cos. \alpha,$$

et :
$$Q = P\,\frac{AO \sin. \alpha}{OC \cos. \alpha} = P\,\frac{AO}{OC} \tang. \alpha.$$

Le produit $P\,\frac{AO}{OC}$ est constant et peut se représenter par K, d'où :
$$Q = K \tang. \alpha,$$

et :
$$\tang. \alpha = \frac{Q}{K}$$

Alors, pour $Q = 1 \ldots \tang. \alpha = \frac{1}{K}$

$$Q = 2 \ldots \tang. \alpha = \frac{2}{K}$$

d'où on conclut que, si par le point E on mène une tangente

à l'arc E E', connaissant l'intersection G de AO avec cette tangente pour une valeur a de Q, il suffit, pour avoir les positions du point A correspondantes aux valeurs $2a, 3a, 4a$, etc., de Q, de porter sur la droite EG indéfiniment prolongée, des longueurs égales à EG et joindre les points de division avec le point O; les intersections A', A'', etc., des droites GO, G'O, G''O etc., avec l'arc EE' donneront les positions de A correspondantes à $Q = a, 2a, 3a$, etc.

La figure 35 représente un peson, imaginé par M. *Laborde*, et fort en vogue à Paris pour les usages domestiques. C'est une des plus jolies applications de cette machine, qui présente trop d'inexactitude et facilite trop la fraude pour être adoptée dans le commerce, tandis que, dans les usages domestiques, elle présente l'avantage de ne pas exiger de poids ni de point de suspension, de pouvoir se placer sur un meuble quelconque, et de coûter fort bon marché comparativement à toute autre.

La balance *Laborde* diffère quelque peu du peson, tel que nous venons de l'examiner, en ce que le zéro de l'aiguille est au point D, non situé sur la verticale abaissée du centre de rotation O, ce qui tient à ce que le plateau ab n'est pas contrebalancé avec intention.

Alors, pour graduer cette balance, on peut ou marquer sur l'arc DK les différents points correspondants à 1, 2, 3, etc. kilogrammes, ou agir ainsi :

Soit Q le poids du plateau, on a :

$$\text{Tang. } \alpha = EF = \frac{Q}{K}; \text{ EF est connu.}$$

$$\text{Tang. } \alpha' = EF' = \frac{Q+1^{\text{kil.}}}{K}$$

$$FF' = EF' - EF = \frac{Q+1}{K} - \frac{Q}{K} = \frac{1^{\text{kil.}}}{K}$$

ce qui indique que, si on détermine le point F' par expérience pour 1 kilog., il suffit de porter FF' autant de fois que l'on veut à partir du point F pour avoir les rayons correspondants à $1^k, 2^k, 3^k$, etc.

De cette manière, on élude l'opération qui aurait pour but de déterminer la valeur exacte de K.

La Poulie.

On donne le nom de poulie à un cylindre (*fig.* 36) d'une petite épaisseur, muni, sur tout le pourtour de sa surface convexe, d'un refouillement appelé gorge, et pouvant tourner sur un axe O passant dans une chape suspendue par un crochet. Sur la gorge de la poulie, est une corde aux extrémités de laquelle sont appliquées deux forces P et Q.

Pour avoir les conditions d'équilibre de ces deux forces, on les décompose chacune en une force appliquée au point O et un couple ayant pour bras de levier le rayon de la poulie; alors les conditions d'équilibre sont les mêmes que celles du levier, et de plus, comme les bras de levier des couples sont égaux, il faut que l'on ait:

$$P = Q.$$

Les deux forces P' et Q', appliquées en O, sont égales entre elles, et leur résultante divise l'angle P'OQ' en deux parties égales, c'est-à-dire passe par le point *m* de rencontre des deux directions de P et Q prolongées, et partage l'angle POQ en deux parties égales. On a alors, en construisant le parallélogramme sur les forces P et Q (*fig.* 37):

$$P : R :: A'C : CO'.$$

Mais les deux triangles A'CO', AOB sont semblables comme ayant les trois côtés perpendiculaires, d'où:

$$A'C : CO' :: OA : AB,$$

donc: $$P : R :: OA : AB :: r : c.$$

La force est à la résultante comme le rayon est à la corde de l'arc embrassé par le cordon.

Si les forces P et Q sont verticales, $c = 2r$, et alors $R = 2P$.

§ 2. — LE TREUIL.

On donne le nom de treuil (*Pl.* IX, *fig.* 81) à un appareil employé pour monter des fardeaux, et composé de deux cylindres concentriques montés sur un même axe, sur l'un desquels s'enroule une corde dont l'extrémité porte la charge à soulever, et dont l'autre, d'une petite épaisseur, est muni, à sa circonférence, de goujons servant à appliquer la force d'un homme.

Soient : P la force tangentielle à la roue,
Q la charge supportée par la corde.

Par le rayon OA et la direction de la force P faisons pas-

ser un plan ; puis, menant, dans ce plan, une parallèle à P, appliquons au point O deux forces P', — P', égales à P et contraires. La force P se trouve ainsi remplacée par une force P' appliquée en O et un couple (P, — P') ayant pour bras de levier O A.

Faisons de même passer un plan par la corde qui supporte Q et le rayon O' B mené au point de contact, et remplaçons la force Q par le couple (Q, — Q') ayant pour bras de levier O' B et la force Q' appliquée en O' sur l'axe.

Les deux forces Q' et P', appliquées sur l'axe, sont détruites par la résistance de ce dernier, et les conditions d'équilibre des deux forces P et Q sont les mêmes que celles des deux couples (P, — P'), (Q, — Q'). Or, pour que ces deux couples soient en équilibre, il faut que :

1° Ils soient situés dans des plans parallèles ;

2° Ils soient dirigés en sens contraires et aient leurs moments égaux.

Mais, la force Q étant verticale et l'axe du treuil horizontal, le plan passant par Q et le rayon O' B sont perpendiculaires à cet axe ; il en résulte que le plan de la force P doit aussi être perpendiculaire à l'axe.

De la seconde relation on tire :

$$P \times OA = Q \times O'B$$

condition absolument la même que celle pour l'équilibre du levier.

Charge sur les points d'appui.

La force P', appliquée au point O, se décompose en deux autres parallèles p, p' appliquées aux extrémités C et D du treuil, et pour lesquelles on a :

$$p : p' : P' :: OD : OC : CD.$$

D'autre part, la force Q', appliquée en O', se décompose aussi en deux autres parallèles q, q', appliquées aux extrémités de CD, et pour lesquelles on a :

$$q : q' : Q' :: O'D : O'C : CD.$$

Les deux forces q et p, appliquées en C, ont une résultante r dirigée suivant la diagonale du parallélogramme construit sur ces deux forces. De même les deux forces q' et p' ont une résultante r *idem*.

(*Voir*, pour les dérivés du treuil, après le plan incliné.)

§ 3. — LE PLAN INCLINÉ ET SES DÉRIVÉS.

Soient AC (*Pl.* VI, *fig.* 38) un plan incliné à l'horizon AB, et M le centre de gravité d'un corps situé sur ce plan. Si Q est le poids de ce corps, il tend à le faire descendre verticalement; mais comme il rencontre le plan, il ne peut que descendre le long de la ligne AC. Alors l'action Q de la pesanteur se trouve décomposée en deux autres, l'une normale à AB, exprimant la pression du corps sur le plan; l'autre, parallèle à AB, et tendant à faire descendre le corps.

Soit α l'angle CAB, l'angle QM$a = \alpha$, car il est compris entre deux perpendiculaires à AC et à AB, on a alors :

Force normale — Q cos. α;
Force parallèle — Q sin. α.

Soit P une force agissant sur la masse M en son centre de gravité : on demande les conditions d'équilibre entre P et Q.

Nous décomposons de même P en deux forces : l'une P sin. β, parallèle à AC ; l'autre P cos. β, normale à AC.

On voit par là que, pour qu'il y ait équilibre, il suffit que l'on ait :

$$P \cos. \beta = Q \cos. \alpha, \text{ou} < Q \cos. \alpha$$
$$P \sin. \beta = Q \sin. \alpha.$$

Remarquant que, dans le triangle rectangle ABC, on a :

$$AB = AC \cos. \alpha$$
$$BC = AC \sin. \alpha$$

On en déduit :

$$\text{Cos. } \alpha = \frac{AB}{AC}$$

$$\text{Sin. } \alpha = \frac{BC}{AC}$$

et :

$$Q \cos. \alpha = Q \frac{AB}{AC}$$

$$Q \sin. \alpha = Q \frac{BC}{AC}$$

Dans le cas où BC$=h$ est très-petit par rapport à AB$=b$, on peut considérer AC comme égal à AB, et alors on a :

$$Q \frac{BC}{AC} = Q \frac{BC}{AB} = Q \text{ tang. } \alpha = Q \frac{h}{b}$$

Cette manière d'exprimer la valeur de Q sin. α est très-usitée dans les constructions de routes, etc., pour déterminer immédiatement la charge à remorquer suivant chaque inclinaison. Ainsi, on nomme pente le rapport entre la hauteur et la base $\frac{h}{b}$, et on dit : une pente de $^{5}/_{100}$, $^{15}/_{1000}$, $^{21}/_{1000}$, etc., pour lesquelles on a :

$$Q \sin.\alpha = Q\,\frac{5}{100},\; Q\,\frac{15}{1000},\; Q\,\frac{21}{1000}$$

relation facile à retenir.

Dans le cas, au contraire, où h a une valeur appréciable par rapport à b, il faut avoir égard à AC. Pour cela, on peut faire ainsi :

$$\overline{AC}^2 = b^2 + h^2 \qquad AC = \sqrt{b^2 + h^2}$$

$$Q \sin.\alpha = Q\,\frac{h}{\sqrt{b^2+h^2}} = \frac{Q}{\sqrt{1+\frac{b^2}{h^2}}} = \frac{Q}{\sqrt{1+n^2}}$$

en faisant $b = nh$; calcul infiniment plus long à faire que l'autre, quelque simple qu'il soit cependant.

DÉRIVÉE DU TREUIL ET DU PLAN INCLINÉ.

La Vis.

Soit ABCD (*fig.* 39) un cylindre dont la surface convexe a été développée en BCME sur le plan du dessin. Divisons BC en un certain nombre de parties égales BR, RQ, etc., et par tous les points de division menons les horizontales RG, QH, etc.; joignons ensuite BG, RH, QK, etc..... OM, et replaçons le rectangle BCME sur le cylindre; les points G, H, etc..... M des lignes BG, RH, etc.,..... OM partant des points B, R,... O, viennent aboutir aux points R, Q .... C, c'est-à-dire à une distance du point de départ de la ligne dont ils font partie, égale à une division prise sur la génératrice BC. Les lignes BG, RH, etc., ainsi enroulées, forment une courbe indéfinie, appelée *hélice*.

Soit P une force perpendiculaire à l'extrémité b du rayon bF d'une circonférence décrite dans un plan perpendiculaire

à l'axe FI du cylindre, et soit a un point de l'hélice sur lequel a lieu une résistance verticale Q; on demande les conditions d'équilibre des deux forces P et Q.

Si par le point a nous menons l'horizontale ba', le point a' de la droite QK représente sur cette droite la position du point a sur l'hélice.

Considérons Q appliquée en a' (*fig.* 39 *bis*). Nous pouvons la décomposer en deux, une normale à QK, détruite par la résistance du filet KQ; l'autre horizontale q', pour laquelle on a, en construisant le parallélogramme des forces :

$$Q' : q' :: a'd' : a'b'$$

Les deux triangles KQH, $a'b'd'$ sont semblables, comme ayant les côtés perpendiculaires, et donnent :

$$a'd' : a'b' :: QH : HK$$
$$:: 2\pi r : a$$

en désignant par r le rayon du cylindre et a la hauteur HK, dite *pas* de l'hélice; on a donc :

$$Q' : q' :: 2\pi r : a$$

et : $$q' = \frac{Q'a}{2\pi r} = \frac{Qa}{2\pi r}$$

Transportant a' en a, la force q' en q, on a pour l'équilibre du treuil que forment les deux forces q et P ayant pour rayon, l'une $ao = r$, l'autre $BF = R$:

$$P \times R = q \times r$$

Remplaçant q par sa valeur $\frac{Qa}{2\pi r}$, il vient :

$$PR = \frac{Qa}{2\pi r} r = \frac{Qa}{2\pi}$$

et : $$P : Q :: a : 2\pi R$$

c'est-à-dire :

La puissance est à la résistance, comme le pas de la vis est à sa circonférence.

DÉRIVÉE DU PLAN INCLINÉ SEULEMENT.

Le coin.

Un coin (*fig.* 40) est un prisme à base triangulaire dont on se sert pour fendre du bois ou des pierres, en l'enfonçant par

une de ses arêtes parallèles et frappant sur la face opposée.

Soit ABC une coupe dans le coin par un plan passant par la direction d'une force P agissant au point D de la face AB.

Cette force se décompose en deux autres, l'une P cos. α normale qui obtient tout son effet, l'autre P sin. α dirigée suivant DB et perdue.

Soit O un point de la direction de la force P cos. α. De ce point abaissons les perpendiculaires OE, OF sur les côtés AC, CB, et décomposons P cos α en deux forces p et p' dirigées suivant ces deux droites. Construisons le parallélogramme sur p et p', et nous aurons :

$$p : p' : P \cos. \alpha :: OI : IG : OG$$

Mais les deux triangles ABC, OIG sont semblables, comme ayant les trois côtés perpendiculaires deux à deux, on a donc :

$$OI : IG : OG :: AC : BC : AB$$

d'où : $p : p' : P \cos. \alpha :: AC : BC : AB$

c'est-à-dire :

Les pressions latérales sont à la pression sur la tête du coin, comme les côtés correspondants du triangle sont entre eux.

On voit par là que :

1° Si AC = CB, les pressions p et p' seront égales entre elles, et le coin suivra la direction de P cos. α, c'est-à-dire s'enfoncera suivant une direction perpendiculaire à sa tête ;

2° Plus AC et CB sont grands, par rapport à AB, plus le coin a de force pour pénétrer dans un corps, la pression sur sa tête restant constante.

ARTICLE II.

MACHINES COMPOSÉES.

§ 1er. — LE POLYGONE FUNICULAIRE.

Soient P, Q, R (*fig.* 41) trois forces en équilibre autour du point O ; l'une quelconque d'entre elles est égale et directement opposée à la résultante des deux autres, et on a la relation :

$$P : Q : R :: \sin. ROQ : \sin. POR : \sin. POQ$$

Si l'une de ces forces P se convertit en un point fixe, on a seulement :

$$Q : R :: \sin. POR : \sin. POQ$$

Si, enfin, P et Q sont deux points fixes, alors R est la ré-

sultante de deux tractions égales dirigées suivant OP et OQ, et si on suppose POQ un cordon dans lequel est un anneau fixé à la force R, cette dernière pourra se mouvoir dans ce cordon d'une manière analogue à la pointe qui sert à décrire une ellipse dont P et Q sont les foyers. La force R est toujours une normale à la courbe, et détruite par la résistance du cordon avec lequel elle fait constamment deux angles égaux entre eux seulement.

Soient maintenant plusieurs forces N, P, Q, R, S appliquées aux points A, B, C du cordon ABC (*fig.* 42), et se faisant équilibre; on demande la relation qui existe entre ces forces.

Soit X la tension du cordon entre les points A et B, Y *idem* entre les points B et C. D'après ce que nous avons dit plus haut, on doit avoir les relations suivantes :

N : P :: sin. PAB : sin. NAB
P : X :: sin. NAB : sin. NAP
X : Q :: sin. QBC : sin. ABC
Q : Y :: sin. ABC : sin. ABQ
Y : R :: sin. RCS : sin. BCS
R : S :: sin. DCS : sin. BCR

Au moyen de ces six proportions, on obtient la valeur de l'une quelconque des forces et tensions en fonction de celle des autres que l'on veut.

Les trois forces N, P, X sont situées dans un même plan. Les trois forces X, Q, Y sont aussi situées dans un même plan, les trois forces Y, R, S aussi.

Si les forces PQR sont situées dans un même plan, alors tout le système est situé dans ce plan.

§ 2. — LES POULIES ET LES MOUFFLES.

1° *Poulies.*

Soient *o*, *o'*, *o''* (*fig.* 43) les centres de trois poulies dont les rayons sont *r*, *r'*, *r''*.

Soient P, P' deux forces appliquées aux extrémités d'une corde enroulée sur la première.

X, X' les tensions d'une autre corde enroulée sur la seconde, et ayant une extrémité au centre *o* de la première.

Y, Y' les tensions d'une corde, enroulée sur la troisième, et ayant une extrémité au centre *o'* de la seconde.

Q une force appliquée au centre o'' de la troisième.

On demande les conditions d'équilibre de toutes ces forces.

Remarquant que, d'après l'équilibre de la poulie, on a :

$$P = P',\ X = X',\ Y = Y'$$

il ne reste plus qu'à connaître les rapports entre P, X, Y et Q.

Or, Q est la résultante des deux tensions Y et Y', on a donc :

$$Q : Y :: C'' : r''$$

Y est la résultante des deux tensions X et X', on a donc :

$$Y : X :: c' : r'$$

X est la résultante des deux tensions P et P'. on a donc :

$$X : P :: c : r$$

Multipliant ces trois proportions l'une par l'autre, il vient :

$$Q : P :: cc'c'' : rr'r''$$

La puissance est à la résistance, comme le produit des rayons des poulies est au produit des cordes des arcs embrassés par les cordons.

si : $P, P', X, X'\ Y, Y', Q$ sont parallèles, alors

on a : $c = 2r,\ c' = 2r',\ c'' = 2r''$

et : $Q : P :: 2 \times 2 \times 2 : 1 :: 8 : 1$

La puissance est à la résistance, comme 1 est à 2 élevé à une puissance marquée par le nombre des poulies.

2° *Moufles.*

Soient A, B, C (*fig.* 44) trois poulies reliées entre elles par une même chape, dans laquelle sont placés leurs trois axes. Soient de même, A', B', C' trois autres poulies reliées entre elles de la même manière.

Soit D un crochet fixé à la chape du haut, et tenant l'extrémité d'une corde enroulée sur les six poulies de la manière représentée dans la figure, et tirée extérieurement par une force P fixée à son autre extrémité.

Soit Q un poids suspendu au crochet E de la chape inférieure, on demande les conditions d'équilibre de P et Q.

Si les cordons sont tous tendus, ils tirent tous également, et alors chacun d'eux supporte une portion de Q. Chacune des trois poulies inférieures étant supportée par deux cordons,

il y a en tout six cordons, et chacun d'eux supporte $\frac{Q}{6}$.
P faisant équilibre à la tension de l'un de ces cordons, on a :

$$P = \frac{Q}{6}$$

c'est-à-dire :

La puissance est à la résistance, comme l'unité est au nombre des cordons de suspension.

§ 3. — LES TREUILS ET ROUES DENTÉES.

Soient trois treuils (*fig.* 45) ayant pour axes o, o', o''. Soient P et Q deux forces appliquées, l'une à la circonférence extérieure du premier treuil, l'autre à la circonférence intérieure du dernier.

Soient X et Y les tensions des cordons tangents aux cylindres r', R' et r', R'', on a :

$$1° \quad P \times R = X \times r$$
$$2° \quad X \times R' = Y \times r'$$
$$3° \quad Y \times R'' = Q \times r''$$

d'où : $P \times R \times R' \times R'' = Q \times r \times r' \times r''$

c'est-à-dire :

La puissance est à la résistance, comme le produit des rayons des petites roues est au produit des rayons des grandes.

La même relation a lieu pour les roues dentées, et alors on dit :

La puissance est à la résistance, comme le produit des rayons des pignons est au produit des rayons des roues.

§ 4. — LE CRIC.

Le cric (*Pl.* X, *fig.* 27 et 28) est une application des roues dentées; la puissance a lieu à l'extrémité du rayon de la manivelle, et la résistance à l'extrémité de la crémaillère.

§ 5. — LA VIS SANS FIN.

La vis sans fin (*Pl.* VI, *fig.* 46) est un composé du treuil et de la vis. AB est l'axe d'une vis mue par une force P appliquée à une manivelle, et o est l'axe d'un treuil dont la grande roue est dentée et engrène avec la vis.

Soit Q un poids soulevé, on demande les conditions d'équilibre entre P et Q.

Soient : R le rayon de la manivelle;
a le pas de la vis;
R′ le rayon de la roue dentée ;
r' le rayon du cylindre;
X la pression au point de contact de la vis et de la roue dentée ;

on a : 1° $P : X :: a : 2\pi R$
2° $X : Q :: r' : R'$

d'où : $P : Q :: ar' : 2\pi RR'$

LIVRE VII.

DYNAMIQUE.

Nous avons dit :

On considère deux états des corps :

Le *repos* et le *mouvement*.

On nomme *statique*, la science qui a pour but la recherche des lois de l'équilibre des corps en repos.

On nomme *dynamique*, la science qui a pour but la recherche des lois de l'équilibre des corps en mouvement.

Nous ajouterons :

On considère deux espèces de mouvements :

Le mouvement rectiligne ;

Le mouvement curviligne.

Le mouvement rectiligne se divise en deux, savoir :

1° Le mouvement uniforme, qui est l'état d'équilibre d'un corps en mouvement ;

2° Le mouvement accéléré, qui est la conséquence d'une rupture de l'équilibre, soit en repos, soit en mouvement uniforme, par une force quelconque.

Deux corps animés d'une même vitesse dans une même direction sont en repos l'un par rapport à l'autre ; les conditions d'équilibre de ces deux corps rentrent donc dans le domaine de la statique. Nous n'avons donc à rechercher ici que les lois de l'équilibre des corps animés de vitesses différentes, soit uniformes, soit accélérées.

ARTICLE Ier.

MOUVEMENT RECTILIGNE.

§ 1er. — MOUVEMENT ACCÉLÉRÉ.

Le mouvement accéléré est le mouvement qui croît continuellement.

Pour fixer les idées, nous supposerons que ce mouvement ne croît qu'à chaque unité de temps.

Soit g l'intensité d'une force, c'est-à-dire la quantité dont elle augmente la vitesse d'un corps auquel elle est appliquée, à chaque unité de temps.

Soit a la vitesse uniforme dont était doué le corps avant d'être soumis à cette force ; alors sa vitesse devient, au bout

d'une unité de temps d'action de la force, $a+g$; au bout de deux unités de temps, $a+2g$, et ainsi de suite; d'où résulte qu'au bout d'un nombre d'unités de temps représenté par t, la vitesse v de ce corps est :

$$v=a+gt$$

c'est-à-dire la vitesse primitive augmentée de t fois l'intensité de la force.

Si on a $a=o$, il vient $v=gt$.

Espace parcouru.

Soient AB (*Pl.* VI, *fig.* 47) le temps employé à parcourir un espace e inconnu; AC la vitesse à la fin du mouvement. Partageons AB en parties égales très-petites que nous considérerons comme des unités de temps; soient a, c, e ... m les points de division. Par ces points menons des parallèles à la base AC, et supposons, comme plus haut, que la force agisse à chaque instant pour imprimer une vitesse uniforme pendant l'instant suivant, augmentée de g.

Alors joignant BC, les parallèles ab, cd, ef.... mn, menées par les points de division de AB à AC, exprimeront les vitesses des corps correspondantes aux temps Ba, Bc, Be .... Bm.

Car les triangles semblables donnent les proportions :

$$AB : AC :: Ba : ab$$

ou :

$$T : V :: t : ab$$

Si AB a été divisé en m parties égales, on a :

$$Ba = t = \frac{AB}{m}$$

d'où : $ab = \frac{V}{m}$ donc $ab=v$, c'est-à-dire la vitesse au bout d'une unité de temps, car cette vitesse est, d'après ce que nous avons démontré plus haut, égale à $\frac{V}{m}$

Lorsque le mouvement est uniforme, l'espace parcouru est égal à la vitesse multipliée par le temps employé à le parcourir.

L'espace parcouru pendant le temps Ba est B$a \times o = o$.

L'espace parcouru pendant le temps ac est $ac \times g$, c'est-à-dire $ac \times ab$, ou le rectangle construit sur ab.

L'espace parcouru pendant le temps ce est $ce \times 2g$, c'est-à-dire $ce \times cd$, ou le rectangle construit sur cd; et ainsi de suite.

Il en résulte que l'espace parcouru pendant le temps total AB est égal à la somme des petits rectangles construits dans l'intérieur du triangle ABC, dont la somme est plus petite que la surface de ce triangle.

Or, si au lieu de supposer que la vitesse ne croît qu'aux divisions $a, c, e, v \ldots m$ du temps AB, nous supposons qu'elle croît à des points infiniment plus rapprochés les uns des autres, il en résulte que la différence entre la somme des rectangles intérieurs et le triangle extérieur va en décroissant, et enfin devient nulle si les instants sont infiniment petits.

Nous concluons de là que l'espace parcouru pendant le temps AB est égal à la surface du triangle ABC, c'est-à-dire à

$$\frac{AB \times AC}{2}$$

or : $AB = t$, $AC = v = gt$, on a donc :

$$e = \frac{t \times gt}{2} = \frac{gt^2}{2}$$

Si le corps était animé primitivement d'une vitesse uniforme a, on a :

$$e = at + \frac{gt^2}{2}$$

§ 2. — MOUVEMENT UNIFORME.

Soit A (*fig.* 48) le point de départ d'un corps soumis à une force accélératrice et se dirigeant vers A'. Soit t le temps employé à parcourir l'espace $AA' = e$, on a, en A' :

$$v = gt$$

$$e = \frac{gt^2}{2}$$

Si en A' on supprime la force accélératrice, le corps continue à se mouvoir uniformément en décrivant des espaces égaux aux temps employés, multipliés par la vitesse v. On a pour un temps t' correspondant à $A'A'' = e'$:

$$e' = vt' = gtt'$$

Faisant dans cette équation $t = t'$, il vient :

$$e' = gt^2 = 2e$$

D'où on conclut le principe suivant :

Lorsqu'un corps a été soumis, pendant un temps donné, à une force accélératrice, les espaces qu'il parcourt, quand cette force a cessé d'agir sur lui, sont doubles, pour le même temps employé, de celui parcouru quand il était soumis à l'action de la force.

Remarques. 1° Pour un même corps soumis à l'action d'une force accélératrice pendant des temps différents t, t', on a pour vitesses de ce corps à la fin de ces temps :

$$v = gt, \text{ et } e = \frac{gt^2}{2}$$

$$v' = gt' \qquad e' = \frac{gt'^2}{2}$$

d'où : $v : v' :: t : t'$

et : $e : e' :: t^2 : t'^2$

c'est-à-dire :

Les vitesses d'un corps soumis à une force accélératrice sont proportionnelles aux temps correspondants, et les espaces parcourus sont proportionnels aux quarrés des temps employés à les parcourir.

2° Si dans la formule $e = \frac{gt^2}{2}$ on fait $t = 1$ unité de temps, il vient :

$$e = \frac{g}{2}$$

L'espace parcouru pendant la première unité de temps est moitié de l'intensité de la force.

3° Soit un corps soumis successivement à deux forces F et F' pendant le même temps ;

Pour la force F on a :

$$v = gt$$

$$e = \frac{gt^2}{2}$$

Pour la force F', on a : $v' = gt$

$$e' = \frac{g' t^2}{2}$$

On admet que les forces sont proportionnelles à leurs intensités sur un même corps, donc:

$$F : F' :: g : g'.$$

Il résulte de là que, connaissant g, on pourra déterminer g', car on aura :

$$v : v' :: g : g' = \frac{v' g}{v}$$

ou $$e : e' :: g : g' = \frac{e' g}{e}$$

4° De la formule $e = \frac{g t^2}{2}$, on tire :

$$t = \sqrt{\frac{2e}{g}}$$

Remplaçant t par cette valeur dans l'expression $v = gt$, il vient :

$$v = g\sqrt{\frac{2e}{g}} = \sqrt{2ge}$$

formule très-employée pour exprimer la vitesse, et indépendante du temps.

§ 3. — MASSES DES CORPS.

On nomme *masse* d'un corps, la quantité de force nécessaire pour mettre ce corps en mouvement.

On admet que les masses sont proportionnelles aux forces nécessaires pour mettre les corps en mouvement. Si deux forces agissent sur un même corps, on a d'après une des observations précédentes :

$$F : F' :: g : g'$$

Si les deux forces impriment le même mouvement à deux corps différents, on a d'après la définition des masses :

$$F : F' :: m : m'$$

Soit proposé de trouver les rapports entre deux forces agissant sur deux corps différents, et leur imprimant des vitesses différentes v, v'.

Pour cela, soit F'' une troisième force, ayant l'intensité g de la première sur le second corps m'.

1° F et F'' imprimant la même vitesse à deux corps dont les masses sont différentes, on a :

$$F : F'' :: m : m'$$

2° F'' et F' agissant sur une même masse, et imprimant des vitesses différentes, on a :

$$F'' : F' :: g : g'$$

Multipliant ces deux proportions l'une par l'autre, il vient :

$$F : F' :: mg : m'g'$$

Les forces sont entre elles comme les produits des masses, auxquelles elles sont appliquées, par leurs intensités.

Pour tous ces calculs, il faut avoir des unités de forces, masses et intensités.

§ 4. — DENSITÉS.

La densité d'un corps, c'est le poids de l'unité de volume de ce corps, le poids de l'unité de volume d'un corps déterminé étant pris pour unité.

On admet que les densités sont proportionnelles aux masses, d'où :

$$D : D' :: m : m'$$

et alors pour deux forces appliquées à deux masses différentes et leur imprimant la même vitesse :

$$D : D' :: F : F'$$

Soient V le volume d'un corps ;
M la masse de *idem* ;
δ la densité de *idem* ;
V' un volume égal d'eau ;
m la masse de l'eau = 1 ;
d la densité de l'eau = 1.

Soit proposé de trouver M : pour cela, faisons V' = 1, nous aurons :

$$\delta : d :: M : m$$

d'où :

$$\delta = \frac{dM}{m}$$

d et *m* étant unités l'une de densité, l'autre de masses, il vient :
$$\delta = M$$
c'est-à-dire que la densité est exprimée par le même nombre que la masse.

En thèse générale, la masse est égale au volume multiplié par la densité.

Les corps, dans le vide, tombent tous avec la même vitesse. Il résulte de là que, quand on soumet deux corps à deux forces qui leur impriment des vitesses égales, il faut que ces forces soient proportionnelles aux poids des corps.

Soient deux volumes égaux d'eau et d'un certain corps :

poids de l'eau $= p$;
poids du corps $= P$;
masse de l'eau $= m$;
masse du corps $= M$;

on a :
$$p : P :: m : M$$
d'où :
$$M = \frac{P\,m}{p}$$

Si p est le poids de l'unité de volume, on a $p = 1$ et $m = 1$, d'où : $M = P$.

Ici la masse n'est autre chose que le poids de l'unité de volume du corps.

La densité est donc la masse de l'unité de volume.

§ 5. — PESANTEUR.

C'est l'attraction, normale à sa surface, qu'exerce la terre sur tous les corps qui l'environnent.

La pesanteur est une force accélératrice constante, puisqu'elle agit constamment sur les corps.

On appelle poids d'un corps, la résultante de toutes les actions parallèles de la pesanteur sur les molécules de ce corps.

Pour déterminer l'intensité de la pesanteur, on a fait usage du plan incliné de Galilée.

Soient A C (*fig.* 49) l'horizon, et A B un plan parfaitement poli, faisant avec l'horizon un angle α. Soit C une sphère, parfaitement polie aussi, que l'on laisse rouler sur ce plan, en partant des différentes positions C, C', C''.

Soient t, t', t'' les temps employés à parcourir les espaces e, e', e'' compris entre les points de départ et le point A. Les

espaces doivent être entre eux comme les quarrés des temps employés à les parcourir, et on doit avoir :

$$e : e' : e'' :: t^2 : t'^2 : t''^2.$$

si la pesanteur est une force accélératrice constante.

Soient :

$$CA = 6.^m, \qquad \text{et } t = 10''$$
$$C'A = 24.^m, \qquad t' = 20''$$

On doit avoir : $\frac{24}{6} = \frac{20^2}{10^2} = \frac{400}{100}$

ce qui a lieu, en effet.

On peut démontrer directement que la pesanteur est une accélératrice constante, et évaluer son intensité de la manière suivante :

Soient AC (*fig.* 50) un plan incliné, M un corps placé sur ce plan, F sa pesanteur. On décompose F en deux forces : une N normale au plan, l'autre $f = F \sin. \alpha$ parallèle au plan. La première est détruite par la résistance du plan, la seconde obtient tout son effet.

1° f est une accélératrice constante, donc F en est une aussi.

2° De la formule $e = \frac{gt^2}{2}$, on tire $g = \frac{2e}{t^2}$

Or, on a pour divers espaces parcourus par le même corps :

$$\frac{e}{t^2} = \frac{e'}{t'^2} = \frac{e''}{t''^2}, \text{ etc.}$$

$\frac{e}{t^2}$ est donc une quantité constante ; il en résulte que g est aussi une quantité constante.

On détermine g' pour f par expérience, en faisant plusieurs fois descendre le corps sur le plan incliné. Connaissant g', on en déduit g en remarquant que les forces, appliquées à une même masse, sont entre elles comme leurs intensités, et on a :

$$f : F :: g' : g$$

d'où : $$g = \frac{Fg'}{f} = \frac{Fg'}{F \sin. \alpha} = \frac{g'}{\sin. \alpha}$$

En procédant ainsi, on a trouvé :

$$g = 9.^{m}8088 \text{ par seconde.}$$

D'où on conclut que la vitesse d'un corps, tombant d'une certaine hauteur, augmente de 9.^{m}8088 par seconde.

De la formule $e = \frac{g t^2}{2}$, on tire, en faisant :

$$t = 1'' \qquad e = \frac{g}{2} = 4.^{m}9044.$$

Le corps parcourt 4.^{m}9044 pendant la première seconde.

$$t = 2'' \qquad e = \frac{4g}{2} = 2g = 19.^{m}6176$$

en deux secondes, et :

$$19.^{m}6176 - 4.^{m}9044 = 14.^{m}7132$$

pendant la deuxième seconde;

14.^{m}7132 = 9.^{m}8088 + 4.^{m}9044 = g + le chemin parcouru pendant la première seconde.

$$t = 3'' \qquad e = \frac{9g}{2} = \frac{9}{2}\, 9.^{m}8088 = 44.^{m}1396$$

en trois secondes.

$$44.^{m}1396 - 19.^{m}6176 = 24.^{m}522$$

pendant la troisième seconde.

Or 24.^{m}522 = 9.^{m}8088 + 14.^{m}7132 = g + le chemin parcouru pendant la deuxième seconde.

Machine d'Atwood.

On a encore employé, pour déterminer la valeur de g, la machine suivante :

Soient m, m' (*fig.* 51) deux corps égaux et également pesants, suspendus chacun à une des extrémités d'un fil de soie passant sur la gorge d'une poulie très-mobile.

Les deux masses m, m' étant égales, il y a équilibre dans quelque position qu'elles se trouvent sur la direction des fils de soie.

Soit μ une petite masse que l'on ajoute du côté de m'. Immédiatement l'équilibre est rompu et la somme des poids $m' + \mu$ entraîne le poids m. Tout le système est donc mis en mouvement par l'effet du poids μ tout seul.

Si μ tombait seule, elle aurait une vitesse dépendant de g, intensité de la pesanteur, beaucoup plus grande que quand elle entraîne les deux masses m et m'.

Or, deux forces agissant sur deux masses différentes μ et $2m+\mu$, et leur imprimant des vitesses différentes, sont entre elles comme le produit de ces masses par leurs propres intensités ; on a donc :

$$F : F' :: \mu g : (2m + \mu) g'$$

Or, F = F', car dans les deux cas c'est le poids de μ qui produit le mouvement ; on a donc :

$$\mu g = (2m + \mu) g'$$

d'où :

$$g = g' \frac{2m + \mu}{\mu}$$

On connaît m et μ. g' se détermine par expérience, sachant que l'on a une force accélératrice constante, et par conséquent :

$$e = \frac{g' t^2}{2}$$

Soient : $m = 1.^{k}00$
$\mu = 0.10$

on a : $g = g' \times \frac{2.10}{0.10} = 21 g'$

et : $g' = \frac{2e}{t^2}$

Faisons $t = 1'' \ldots g' = 2e$

on doit trouver : $e = 0.^{m}23355$,

car alors : $g' = 0.^{m}4671$

et : $g = 9.^{m}8088$.

Pendule.

Soit cm (*fig.* 52) un fil, non pesant, fixé par une extrémité à un point c, et supportant par son autre extrémité une masse m. Si aucune force étrangère ne vient agir sur la masse m soumise à l'action de la pesanteur, la ligne cm est verticale.

Faisons décrire à la masse m l'arc de cercle mm', et voyons

ce qui va se passer si, après l'avoir amenée en m', nous abandonnons cette masse à elle-même.

Le poids P de m se décompose en deux forces, l'une T, tangente à l'arc décrit, l'autre f, normale. La première obtient tout son effet, la seconde est détruite par la résistance du fil.

On a : $T = P \sin. \alpha$.

A mesure que m' se rapproche de m, en retombant, α diminue, $\sin. \alpha$ diminue et T diminue; enfin pour $\alpha = 0$ il vient $T = 0$. Donc au point m le corps va continuer à se mouvoir en vertu de la vitesse acquise, et va tendre à décrire des espaces doubles de ceux parcourus, dans des temps égaux.

Mais sitôt que le corps a dépassé la verticale, il décrit un nouvel arc de cercle autour du point c, et alors son poids P se décompose en deux forces, l'une T, tangente, qui agit en sens contraire du mouvement, l'autre f, normale; qui est détruite par la résistance du fil.

T va en augmentant au fur et à mesure que le corps s'éloigne du point m; enfin quand T est arrivé à être assez grand pour faire équilibre à la vitesse acquise, le corps s'arrête et redescend pour recommencer la même opération de l'autre côté, et ainsi de suite.

Soit m'' le point où le corps s'est arrêté faisant avec la verticale l'angle β; cet angle doit être égal à l'angle α, car tout se comporte pour monter de m en m'', comme pour descendre de m' en m. D'après cela le mouvement doit être infini.

Soit t le temps d'une oscillation, c'est-à-dire le temps pour passer du point m' au point m'';

g l'intensité de la pesanteur;

l la longueur du pendule, c'est-à-dire la distance entre le point c et le centre de gravité du pendule.

On a trouvé que pour des petites oscillations, le temps employé est indépendant de l'amplitude des oscillations et peut s'exprimer ainsi :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

π étant le rapport de la circonférence au diamètre.

Pour démontrer cette formule, soient AC (*fig.* 53) un plan incliné, et m un corps descendant sur ce plan :

Nous disons que si ce corps part du point A, sa vitesse, en arrivant au point e, sera la même que celle qu'il aurait au point B s'il était tombé verticalement.

En effet, pour un corps tombant de A en B, on a :

$$v = a + gt$$

$$e = at + \frac{gt^2}{2}$$

Pour un corps allant de A en C :

$$v' = a + g' t'$$

$$e' = at + \frac{g' t'^2}{2}$$

Or : $e = AB$, $e' = AC$

$$g' = g \cos. \alpha, \qquad e' = \frac{e}{\cos. \alpha}$$

On a donc : $v' = a + g \cos. \alpha\, t'$ . . . . . . (1)

$$\frac{e}{\cos. \alpha} = at' + \frac{g \cos. \alpha\, t'^2}{2} \quad . . . . (2)$$

De l'équation (1) on tire :

$$t' = \frac{v' - a}{g \cos. \alpha}$$

Substituant cette valeur de t' dans la seconde équation, il vient :

$$\frac{e}{\cos. \alpha} = a \frac{v' - a}{g \cos. \alpha} + {}^1/_2 \frac{(v' - a)^2}{g \cos. \alpha}$$

d'où : $$e = a \frac{v' - a}{g} + {}^1/_2 \frac{(v' - a)^2}{g}$$

Si de cette équation on tire la valeur de v', on obtient cette valeur indépendante de l'angle α. Donc, quel que soit l'angle α, la valeur de v' est toujours la même, d'où pour $\alpha = 0$ on doit avoir $v' = v$. C'est ce que l'on trouve en effet en résolvant l'équation, et en remarquant que $v^2 = a^2 + 2ge$.

Donc, si un corps partant du point A (*fig.* 54) prend indifféremment l'une des directions AB, AC, AC', AC", etc., sa vitesse, en arrivant à l'un quelconque des points B, C, C', C", etc., sera la même.

Il en résulte que si un corps partant du point A (*fig.* 55) prend successivement les directions AC, CC', CC", C"C"', sa

vitesse, en arrivant au point C''', sera la même que celle qu'il aurait acquise au point B''' en suivant la verticale AB'''.

Donc, pour en revenir au pendule, la vitesse du corps parti de m' et arrivant en m est la même que celle qu'il aurait acquise en tombant verticalement d'une hauteur égale à la différence de niveau entre ces deux points.

Soit donc cm (*fig.* 56) un pendule; nous aurons comme plus haut :

$$T = P \sin. \alpha.$$

Soit l'angle α très-petit, auquel cas on a : $\sin. \alpha = \alpha$.

Les oscillations étant très-petites, on a constamment $T = P\alpha$.

Soient m', m'' deux positions infiniment voisines du pendule, pendant une oscillation, on a, en menant par les deux points m' et m'' les horizontales $m'p$, $m''p'$:

1° De m' en m $\quad v = \sqrt{2g \times pm}$

2° De m'' en m $\quad v' = \sqrt{2g \times p'm}$

3° De m' en m'' $\quad v'' = \sqrt{2g \times pp'}$

$$\text{Or } cp = l \cos. \alpha = l\sqrt{1 - \sin.^2 \alpha} = l\sqrt{1 - \alpha^2} = l\left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right)$$

$$cp' = l \cos. \omega = l\sqrt{1 - \sin.^2 \omega} = l\sqrt{1 - \omega^2} = l\left(1 - \frac{\omega^2}{2}\right)$$

à très-peu près.

Car le quarré de $1 - \frac{\alpha^2}{2}$ est $1 - \alpha^2 + \frac{\alpha^4}{4}$, et comme α est très-petit, il en résulte que $\frac{\alpha^4}{4}$ est négligeable.

On en déduit :

$$cp' - cp = pp' = \frac{l}{2}(\alpha^2 - \omega^2)$$

et :

$$v'' = \sqrt{gl(\alpha^2 - \omega^2)}$$

Or, le mouvement étant très-petit, on peut le considérer comme uniforme, et alors ;

$$e = v'' t$$

d'où :
$$v'' = \frac{e}{t}$$

et :
$$\frac{e}{t} = \sqrt{g l (\alpha^2 - \omega^2)}$$

d'où on tire :

$$t = \frac{e}{\sqrt{g l (\alpha^2 - \omega^2)}} = \frac{1}{\sqrt{g l}} \cdot \frac{e}{\sqrt{\alpha^2 - \omega^2}}$$

t étant le temps écoulé pour le passage du point m' au point m'', sa valeur est très-petite. Le temps d'une oscillation entière se compose de la somme de tous les t, t', t'' etc., employés à décrire les arcs infiniment petits dont elle se compose.

Or, ils ont tous, dans l'expression de leur valeur, le facteur commun
$$\frac{1}{\sqrt{g l}}$$

et on a :
$$T = \frac{1}{\sqrt{g l}} \left(\frac{e}{\sqrt{\alpha^2 - \omega^2}} + \text{etc.} \right)$$

Remplaçant e par $l\omega'$, ω' étant la même chose que sin. ω', on a :

$$t = \frac{1}{\sqrt{l g}} \frac{l\omega'}{\sqrt{\alpha^2 - \omega^2}} = \sqrt{\frac{l}{g}} \frac{\omega'}{\sqrt{\alpha^2 - \omega^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{l}{g}} \frac{\frac{\omega'}{\alpha}}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\alpha^2}}}$$

$\frac{\omega}{\alpha}$ doit être compris entre zéro et 1 ; car s'il était plus grand que 1, le radical serait négatif, et la valeur de t serait imaginaire.

Faisant la somme de toutes les valeurs que prend $\frac{\omega}{\alpha}$ de-

puis zéro jusqu'à 1 pour chaque t, on peut représenter chacune de ces sommes par un sinus. Or la différence entre deux sinus consécutifs $m\,p$, $m'\,p'$ (*fig.* 57) est $m'\,I$, d'où :

$$M'I : MM' :: PO : MO$$

en admettant que MM' est perpendiculaire à MO.

Faisant :
$$\frac{\omega}{\alpha} = u = MP$$
$$\frac{\omega'}{\alpha'} = u' = M'I$$

on en déduit :

$$u' : MM' :: \sqrt{1-u^2} : 1$$

d'où : $MM' = \dfrac{u'}{\sqrt{1-u^2}}$ quantité constante,

t est donc constamment égal à $\sqrt{\dfrac{l}{g}}\ \dfrac{u}{\sqrt{1-u^2}}$

Or, la somme de tous les petits arcs est $\dfrac{\pi}{2}$, on a donc :

$$T' = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{l}{g}}$$

pour la demi-oscillation, et :

$$T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

pour l'oscillation entière.

On a fait osciller un pendule ; on a calculé le temps pour plusieurs mille d'oscillations ; on en a déduit le temps pour une oscillation, et de là :

$$g = 9.^{m}8088.$$

Remarquons toutefois que la formule n'a lieu que quand $\alpha - \sin.\,\alpha$ est insensible.

Soient T et T' les temps d'une oscillation d'un même pendule dans des lieux différents, on a :

$$T^2 = \pi^2 \frac{l}{g}$$

$$T'^2 = \pi^2 \frac{l}{g'}$$

On en déduit : $T^2 : T'^2 :: g' : g$

Les intensités de la pesanteur sont en raison inverse des quarrés des temps d'une oscillation.

Si on opère sur deux pendules, en même temps, dans un même lieu :

on a pour le 1er $T^2 = \pi^2 \frac{l}{g}$

pour le 2e $T^{2\prime} = \pi^2 \frac{l'}{g}$

$$T^2 : T'^2 :: l : l'$$

Les longueurs des pendules sont proportionnelles aux quarrés des temps d'une oscillation.

Si on opère sur des pendules inégaux dans des lieux différents, on a :

$$T^2 = \pi^2 \frac{l}{g}$$

$$T'^2 = \pi^2 \frac{l'}{g}$$

Supposons un pendule auxiliaire qui donne :

$$t^2 = \pi^2 \frac{l}{g'}$$

on aura :

1° $T^2 : t^2 :: g' : g$

2° $t^2 : T'^2 :: l : l'$

d'où : $T^2 : T'^2 :: lg' : l'g.$

La valeur 9.m8088 de g est celle trouvée à Paris. Elle varie

nécessairement suivant les différents points du globe. Au moyen du pendule il est facile de la déterminer exactement en chacun de ces points.

Les corrections relatives à l'usage du pendule sont :

1° L'amplitude des oscillations ;

2° La résistance de l'air ;

3° La perte de poids dans le fluide déplacé ;

4° La température.

La longueur du pendule qui bat la seconde à Paris est :

$$l = \frac{9.8088 \times 1^2}{9.9} = 0.^{m}993846$$

ARTICLE II.

MOUVEMENT CURVILIGNE.

Soit A (*fig.* 58) le point de départ d'un corps lancé de bas en haut, suivant la direction AT.

La pesanteur, agissant sur ce corps, détruit petit à petit l'effet de la force initiale, et alors le corps, au lieu de suivre la direction AT, parcourt successivement les éléments rectilignes infiniment petits Am, mm', $m'm''$, etc., jusqu'à ce qu'il soit retombé en un point symétrique au point A, à partir duquel la pesanteur seule agit.

En premier lieu nous disons :

La courbe parcourue par le mobile est une courbe plane, car les directions successives de la pesanteur étant parallèles, il n'y a pas plus de raison pour que le mobile sorte du plan de AT et de la première verticale d'un côté que de l'autre.

Soient Ox, Oy (*fig.* 59) deux axes perpendiculaires, OM le chemin parcouru par un point M lancé dans la direction AL du point A.

Faisons
$$OP = x,$$
$$MP = y.$$

Soit t le temps employé par le point M à parcourir l'espace AM.

Nous remarquerons que si, au moment où M part du point A, les points P et Q partent des points B et C, *abcisse* et *ordonnée* du point A, ils auront parcouru BP et CQ pendant que M aura parcouru AM.

Or, connaissant BP et CQ, nous connaîtrons la position du point M.

Soit a la vitesse initiale du mobile au point A, dans la direction A L. On décompose a en deux, X et Y dirigées la première parallèlement à ox, la seconde parallèlement à oy. Il en résulte que si P part de B avec la vitesse X, et Q de C avec la vitesse Y, P arrive en P et Q en Q en même temps que M en M, puisqu'ils ont des vitesses *initiales* égales dans le même sens.

La vitesse X de P est uniforme, car l'action de la pesanteur est verticale.

La vitesse Y de Q est sans cesse décroissante par suite de l'action contraire de la pesanteur.

Les espaces parcourus dans le temps t sont donc :

Pour P . . . . . . $BP' = a \cos. \alpha t$

Pour Q . . . . . . $CQ = a \sin. \alpha t - \frac{gt^2}{2}$

$a \cos. \alpha$ et $a \sin. \alpha$ étant les composantes de a suivant ox et oy.

Appelons b, c les coordonnées du point A, nous aurons :

$$BP = x - b \qquad CQ = y - c.$$

Donc : 1° $x - b = a \cos. \alpha t$

d'où : $x = a \cos. \alpha t + b$ . . . . (1)

2° $y - c = a \sin. \alpha t - \frac{gt^2}{2}$

d'où : $y = c + a \sin. \alpha t - \frac{gt^2}{2}$ (2)

telles sont les valeurs des coordonnées du point M.

D'après ce, on peut construire la courbe par points en faisant successivement $t = 1'', 2'', 3''$, etc.

Eliminant t, entre ces deux expressions, nous aurons l'équation de la courbe.

Pour cela, nous tirons de (1) :

$$t = \frac{x - b}{a \cos. \alpha}$$

Substituant cette valeur dans la seconde équation, nous avons :

$$y = c + a \frac{x - b}{a \cos. \alpha} \sin. \alpha - \frac{g}{2} \frac{(x - b)^2}{a^2 \cos.^2 \alpha}$$

d'où :

$$a^2 \cos.^2\alpha y = a^2 c \cos.^2\alpha + a^2 \cos.\alpha (x-b) \sin.\alpha - \frac{g}{2}(x-b)^2$$

Ordonnant par rapport à x :

$$\frac{g}{2} x^2 - x(a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha + gb) + a^2 \cos.^2\alpha y - a^2 \cos.^2\alpha c +$$
$$a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha b + \frac{g}{2} b^2 = 0.$$

Faisant disparaître le coefficient de x :

$$x^2 - x \frac{2(gb + a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha)}{g} + \frac{2a^2 \cos.^2\alpha}{g} y + b^2 +$$
$$\frac{2a^2 \cos.^2\alpha}{g} c + \frac{2a^2 \sin.\alpha \cos.\alpha}{g} b = 0$$

Equation d'une parabole dont les axes sont parallèles aux axes principaux, s'étendant indéfiniment dans le sens des y négatifs.

Supposons $\alpha = 100^\circ$, il vient alors :

$$\text{Sin.}\,\alpha = 1 \qquad \cos.\,\alpha = 0$$

d'où : $$x^2 - 2bx + b^2 = 0$$

et : $$(x-b)^2 = 0$$

expression indépendante de y, ce qui démontre que pour $x = b$, tous les points de la perpendiculaire satisferont à l'équation, et que par conséquent la courbe sera une perpendiculaire à l'axe des x.

Vitesse.

Soit v la vitesse du point M, on la décompose en deux, X et Y rectangulaires, et on a $X = a \cos.\alpha \quad Y = a \sin.\alpha - \frac{gt^2}{2}$

Nous démontrerons ci-dessous que l'on a aussi :

$$v = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{a^2 \cos.^2\alpha + \left(a \sin.\alpha - \frac{gt^2}{2}\right)^2}$$

Il en résulte que :

$$\text{pour } \alpha = 100^\circ \qquad v = a - gt$$

si l'on fait $v = 0$, on obtient $a - gt = 0$ et $t = \frac{a}{g}$, correspondant au point le plus élevé de la ligne parcourue par le mobile.

Cette valeur de t est celle du temps que le corps met à s'élever. D'où, sachant que l'on a $e = \frac{g t'^2}{2}$, on peut déterminer la hauteur e à laquelle le corps s'est élevé, connaissant t', lequel est égal au temps total employé pour monter et descendre, moins le temps employé à monter,

donc : $$t' = T - t = T - \frac{a}{g}$$

T se détermine par expérience.

Pour démontrer que l'on a :

$$v = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

soient m et m' (*fig.* 60) deux points infiniment voisins de la courbe parcourue par le mobile ; θ le temps, infiniment petit, employé à parcourir l'espace mm'.

Pendant ce temps, p passe en p' et q en q' ; le mouvement de m est uniforme, comme très-petit, et les deux autres aussi.

Or, dans le mouvement uniforme on a :

1° Pour m . . $v = \frac{mm'}{\theta}$ et . . $v^2 = \frac{\overline{mm'}^2}{\theta^2}$

2° *id.* p . . $X = \frac{pp'}{\theta}$ . . . . $X^2 = \frac{\overline{pp'}^2}{\theta^2}$

3° *id.* q . . $Y = \frac{qq'}{\theta}$ . . . . $Y^2 = \frac{\overline{qq'}^2}{\theta^2}$

Or : $\overline{mm'}^2 = \overline{mB}^2 + \overline{mA}^2 = \overline{qq'}^2 + \overline{pp'}^2$

On a donc, en remplaçant mm', pp' et qq' par leurs valeurs :

$$v^2 = X^2 + Y^2$$

d'où : $$v = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Discussion.

Résolvant, par rapport à x, l'équation générale que nous avons trouvée, il vient :

$$x = \frac{gb + a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha}{g} \pm \sqrt{\frac{(gb + a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha)^2}{g^2} - \frac{2a^2 \cos.^2\alpha}{g} y - b^2 - \frac{2a^2 \cos.^2\alpha\, c}{g} - \frac{2a^2 \sin.\alpha \cos.\alpha}{g} b}$$

1° Soit proposé de déterminer sous quel angle, au point de départ, le mobile s'élèvera à la plus grande hauteur.

La courbe ayant son ouverture du côté des y négatifs, la plus grande hauteur du mobile correspond à son sommet, pour lequel x n'a qu'une seule valeur, ce qui ne peut avoir lieu qu'en posant :

$$\frac{(gb + a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha)^2}{g^2} - \frac{2a^2 \cos.^2\alpha}{g} y - b^2 - \frac{2a^2 \cos.^2\alpha\, c}{g}$$
$$- \frac{2a^2 \sin.\alpha \cos.\alpha}{g} b = 0$$

d'où : $$x = \frac{gb + a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha}{g}$$

et $$y = \frac{(gb + a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha)^2}{2ga^2 \cos.^2\alpha} - \frac{gb^2}{2a^2 \cos.^2\alpha} - c - \frac{\sin.\alpha\, b}{\cos.\alpha}$$

expressions dans lesquelles α est la seule indéterminée.

Afin de simplifier les équations, supposons que le mobile parte de l'origine des coordonnées, alors $b = 0$, $c = 0$ et on a :

$$x = \frac{a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha}{g} \text{ et } y = \frac{a^4 \cos.^2\alpha \sin.^2\alpha}{2ga^2 \cos.^2\alpha} = \frac{a^2 \sin.^2\alpha}{2g}$$

Plus sin. α est grand, plus y est grand; donc pour sin. $\alpha = 1$ ou $\alpha = 90°$; le mobile ira le plus haut et on aura :

$$x = 0 \qquad y = \frac{a^2}{2g}$$

2° Soit proposé de déterminer sous quel angle le mobile ira retomber le plus loin.

Faisant comme plus haut $c=0$, $b=0$, on a :

$$x = \frac{a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha}{g} \pm \sqrt{\frac{a^4 \cos.^2\alpha \sin.^2\alpha}{g^2} - \frac{2a^2\cos.^2\alpha}{g} y}$$

Le point où le mobile retombera, au niveau du point de départ, n'est autre que celui pour lequel on a : $y=0$.

d'où : $$x' = \frac{2a^2 \cos.\alpha \sin.\alpha}{g}$$

$$x'' = 0$$

x' est l'abçisse du point demandé; x'' celle du point de départ.

La plus grande valeur de x' correspond à la plus grande valeur du produit sin. α cos. α.

Pour cela nous remarquons que l'on a :

$$\text{Sin.}^2 \alpha + \cos.^2 \alpha = 1$$

Faisant sin. $\alpha = x$, il vient cos. $\alpha = \sqrt{1-x^2}$

donc : $x\sqrt{1-x^2}$ doit être un maximum.

Posons : $$x\sqrt{1-x^2} = y$$

il vient : $$x^2(1-x^2) = y^2$$

$$x^2 - x^4 = y^2$$

Pour éviter l'équation du quatrième degré, on fait $x^2 = z$;

d'où : $$z - z^2 = y^2$$

et : $$z^2 - z + y^2 = 0$$

$$z = {}^1/_2 \pm \sqrt{{}^1/_4 - y^2}$$

$y^2 = {}^1/_4$ est le maximum de valeur de y; dans ce cas on a :

$z = {}^1/_2$; d'où : $x^2 = {}^1/_2$ $x = \sqrt{{}^1/_2}$

donc : sin. $\alpha = \sqrt{{}^1/_2}$ cos. $\alpha = \sqrt{1 - {}^1/_2} = \sqrt{{}^1/_2}$

et : sin. α = cos. α

d'où : α = 45 degrés.

C'est lancé sous un angle de 45°, que le mobile ira retomber le plus loin.

Reprenant l'expression :

$$x' = \frac{2a^2 \sin.\alpha \cos.\alpha}{g}$$

et remplaçant sin. α et cos. α par $\sqrt{{}^1/_2}$, il vient :

$$x' = \frac{a^2}{g}$$

Nous avons en outre trouvé pour valeur de l'ordonnée du sommet de la courbe :

$$y = \frac{a^2 \sin.^2 \alpha}{2g}$$

Pour $\alpha = 45^0$ $\sin.^2 \alpha = {}^1/_2$ et $y = \dfrac{a^2}{4g}$

d'où l'on conclut que quand l'inclinaison du mobile, au point de départ, est de 45 degrés, la distance entre ce point et le point de chute est quadruple de la hauteur à laquelle il s'élève ;

ce qui indique que $x' = \dfrac{a^2}{g}$ est la double abcisse passant par le *foyer*, et que le *demi-paramètre* ou distance du foyer à la directrice est égal à $\dfrac{a^2}{2g}$.

Donc, lorsque l'angle $\alpha = 45^o$, le foyer est situé sur l'horizontale passant par le point de départ et au milieu de la distance entre le point de départ et le point de chute.

3o Soit proposé de déterminer quel doit être l'angle α pour que le mobile tombe en un point donné.

Soient A le point de départ (*fig.* 61) et B le point de chute desiré. L A B $= \alpha$ l'angle que forme la direction du mobile, à son départ, avec l'horizontale A B.

Pour $y = 0$ on a $x' = \dfrac{2\,a^2 \sin.\,\alpha \cos.\,\alpha}{g}$

Soit A B $= d$, on a, en remplaçant x' par son égal d :

$$d = \frac{2\,a^2 \sin.\,\alpha \cos.\,\alpha}{g}.$$

d'où : $$\sin.\,\alpha \sqrt{1 - \sin.^2 \alpha} = \frac{g\,d}{2\,a^2}$$

$$\sin.^2 \alpha \, (1 - \sin.^2 \alpha) = \frac{g^2 d^2}{4 a^4}$$

$$\sin.^2 \alpha - \sin.^4 \alpha = \frac{g^2 d^2}{4 a^4}$$

Soit $\sin.^2 \alpha = x$

$$x - x^2 = \frac{g^2 d^2}{4 a^4}$$

$$x^2 - x + \frac{g^2 d^2}{4 a^4} = 0$$

$$x = 1/2 \pm \sqrt{1/4 - \frac{g^2 d^2}{4 a^4}}$$

et : $$\sin. \alpha = \pm \sqrt{1/2 \pm \sqrt{1/4 - \frac{g^2 d^2}{4 a^4}}}$$

Il n'y a réellement que deux valeurs pour sin. α, parce que la valeur négative indique que l'on peut prendre AB soit à droite soit à gauche du point A.

Résistance de l'air.

La résistance de l'air croît comme le quarré de la vitesse. Elle est proportionnelle à la section du corps qui lui oppose une surface; soit f la résistance de l'air.

On a pour deux forces f, f' appliquées à une même masse et lui imprimant des vitesses différentes :

$$f : f' :: v^2 : v'^2$$

On a aussi pour des vitesses égales imprimées à des masses différentes :

$$f : f' :: m : m' :: \omega : \omega'$$

ω et ω' étant les sections ou corps.

Nous avons démontré que pour des vitesses différentes et des masses différentes on a :

$$f : f' :: m v^2 : m' v'^2$$

On a aussi :

$$f : f' :: \omega v^2 : \omega' v'^2$$

On peut donc en conclure :

$$f = K \omega v^2$$

K étant égal à $\frac{f'}{\omega' v'^2}$

De même que l'on peut représenter la résistance de l'air f par $K \omega v^2$, de même aussi on peut représenter la pesanteur F par $K' mg$, car on a :

$$F : F' :: mg : m'g'$$

Il suit de là que, pour le mouvement d'un corps dans l'air, on a, pour le cas où le corps tombe :

La pesanteur agit de haut en bas, et imprime au corps une force $F = K' mg$.

La résistance de l'air agit de bas en haut et imprime au corps une force contraire $f = K \omega v^2$.

Le mouvement du corps est dû à la différence de ces deux forces; pour déterminer ce mouvement, il faut connaître F et f à chaque instant, afin de pouvoir les comparer, ce qui consiste simplement à prendre leur rapport, et on a :

$$\frac{f}{F} = \frac{K \omega v^2}{K' mg} = \frac{K v^2}{K' g} \times \frac{\omega}{m}$$

Supposons un corps sphérique. ω est un grand cercle, m est la masse ou la densité multipliée par le volume : donc,

$$m = vd = \frac{4}{3} \pi R^3 d$$
$$\omega = \pi R^2$$

$$\frac{f}{F} = \frac{K v^2}{K' g} \quad \frac{\pi R^2}{\frac{4}{3} \pi R^3 d} = \frac{3 K v^2}{K' g} \quad \frac{1}{R d}$$

Le rapport $\frac{f}{F}$ sera d'autant plus petit que la fraction $\frac{1}{Rd}$ sera plus petite, les autres quantités K, v, K', g étant invariables pour un *moment* déterminé.

Nous en concluons que plus le rayon de la sphère est grand, plus la résistance de l'air est petite.

Plus la densité du corps est grande, plus la résistance de

l'air est aussi petite, bien entendu par rapport à la force de la pesanteur qui fait mouvoir le corps.

Considérant le corps dans tout le mouvement de sa chute, nous voyons que plus v augmente, plus f augmente aussi, et f augmente comme le quarré de v.

Donc, plus un corps sphérique a de vitesse, plus l'air a de force contre lui.

Il peut arriver alors, dans le mouvement d'un corps dans l'air, un moment où f est égal à F. Dès ce moment le corps cesse d'être doué d'un mouvement accéléré, et il continue à avancer d'un mouvement uniforme avec la vitesse acquise en ce point.

Tant que l'on a $F > f$, la force accélératrice en vertu de laquelle le corps augmente de vitesse à chaque instant est :

$$F - f = K' m g - K \omega v^2$$

Au moment où f devient égal à F, on a :

$$K' m g = K \omega v^2$$

d'où : $$v = \pm \sqrt{\frac{K' m g}{K \omega}} = \pm \sqrt{\frac{K' g}{K} \times \frac{4 R d}{3}}$$

On voit par là que, dans le mouvement curviligne dans l'air, le corps ne décrit pas réellement une parabole comme nous l'avons trouvé, pour le vide, mais une courbe qui s'en rapproche d'autant plus, que la densité du corps est plus considérable et son rayon plus grand.

ARTICLE III.

CHOC DES CORPS.

Soient M et M' (*fig.* 62) deux corps sphériques qui partent en même temps, l'un du point A avec la vitesse v, l'autre du point B avec la vitesse v', et vont à la rencontre l'un de l'autre.

Il peut se présenter trois cas :

1° *Ou les corps sont parfaitement élastiques;*

2° *Ou les corps sont parfaitement mous;*

3° *Ou les corps participent plus ou moins des deux facultés précédentes.*

Nous définirons par corps élastiques ou mous, les corps jouissant des propriétés suivantes :

Soit CD un plan perpendiculaire à AB.

Si le corps M, animé de la vitesse v, est parfaitement *mou*, il

viendra frapper sur le plan CD, s'aplatira et restera collé contre ce plan.

Si, au contraire, le corps M est parfaitement élastique, il frappera sur le plan, s'aplatira, puis reviendra à sa forme primitive et retournera vers l'endroit d'où il est parti avec une vitesse égale à celle qu'il avait avant le choc.

La troisième espèce de corps constitue tous les corps de la nature, dont aucun ne jouit de la propriété d'être parfaitement mou ou parfaitement élastique.

Nous déterminerons les lois du choc des corps pour les deux premiers cas, et le troisième s'en déduira approximativement suivant le degré d'élasticité du corps considéré.

§ 1er. — CHOC DES CORPS MOUS.

Soit a (*fig.* 62) le point de rencontre de deux corps mous partis en même temps l'un du point A, l'autre du point B avec les vitesses respectives v et v'.

Soit F la force en vertu de laquelle la masse M a la vitesse v, et F' la force en vertu de laquelle la masse M' a v'.

On a : $F : F' :: mv : m'v'$

Il peut se présenter trois cas, savoir :

$$1^{o}\quad mv > m'v'$$
$$2^{o}\quad mv = m'v'$$
$$3^{o}\quad mv < m'v'$$

Imaginons une force qui, appliquée pendant un certain temps sur M en sens contraire de son mouvement, finit par l'anéantir. Cette force étant indéterminée, on peut la supposer telle que le temps pendant lequel elle agit est infiniment petit ; soit θ ce temps.

Considérons d'abord le cas où l'on a :

$$1^{o}\ mv = m'v'$$

Puisque le corps M a la vitesse v au point de contact de l'action de la force F, et le corps M' la vitesse v' en vertu de l'action de la force F', il faut, pour les arrêter, que l'on oppose au premier une force F, et au second une force F'.

Soit CD un plan placé au point A perpendiculairement à la direction des deux corps, et supposons que ce plan oppose à la masse M une résistance F, et à la masse M' une résistance F'.

Puisqu'on a $mv = m'v'$, il en résulte que l'on aura $F = F'$.

Les deux corps se frapperont, s'aplatiront, et le mouvement sera anéanti.

$$2^o \quad mv > m'v'$$

Donnons à la droite AB, dans le sens du mouvement de la masse M, une vitesse u; supposons qu'elle entraîne avec elle les deux masses m et m'.

Quand la droite est fixe, le corps M doit avoir la vitesse v pour arriver en a en même temps que M'. Or, si la droite a déjà u, la masse M aura $v + u$; il faut donc lui donner sur la droite une vitesse $v - u$ pour qu'elle ait v dans l'espace, car alors on a :

$$v - u + u = v.$$

De même M' avance en sens contraire de u avec la vitesse u'; il faut donc lui donner $v' + u$ sur la droite, pour qu'elle ait v' dans l'espace.

$$v' + u - u = v'$$

u étant une indéterminée, on lui suppose une valeur telle que l'on ait :

$$m\ (v - u) = m'\ (v' + u)$$

$v - u$ et $v' + u$ étant les vitesses des corps sur la droite, il arrive, d'après cette relation, que les corps se trouvent vis-à-vis l'un de l'autre, dans la même situation que dans le cas précédent. Ils se choqueront, s'aplatiront, et tout mouvement sur la droite sera anéanti. Mais la droite a toujours sa vitesse u dans le sens de Aa; les corps étant situés sur la droite, avanceront avec elle. Donc, après le choc, les deux corps continueront à se mouvoir avec la vitesse u dans le sens de la masse M.

Pour déterminer u, on a l'équation :

$$m\ (v - u) = m'\ (v' + u)$$

d'où : $$u = \frac{mv - m'v'}{m + m'}$$

Il est inutile de considérer le cas où l'on a : $mv < m'v'$, c'est l'inverse.

Cas où les corps vont dans le même sens.

Soit AB le sens du mouvement, c'est-à-dire de gauche à droite.

Si on a $v < v'$ ou $= v'$, les deux corps ne se rencontreront jamais. Il faut donc supposer $v > v'$.

La solution est la même, que l'on ait $mv > m'v'$, $mv = m'v'$, $mv < m'v'$.

Nous donnons à la droite une vitesse u dans le sens du mouvement. v étant plus grand que v', on peut supposer que l'on a :

$$v > u > v'$$

Alors la vitesse de la masse M, sur la droite, sera $v - u$, car $v - u + u = v$.

La vitesse de la masse M', sur la droite, sera $v' - u$, car $v' - u + u = v'$. Comme v' est plus petit que u, $v' - u$ dans le sens du mouvement est la même chose que $u - v'$ en sens contraire.

Alors, nous rentrons dans le cas précédent, où deux corps vont à la rencontre l'un de l'autre, sur la droite animée dans le sens de l'un d'eux, d'une vitesse u. Comme u est indéterminée, on peut supposer que l'on a :

$$m\,(v - u) = m'\,(u - v')$$

d'où :

$$u = \frac{mv + m'v'}{m + m'}$$

Telle sera la vitesse avec laquelle les deux corps continueront à se mouvoir après le choc. Cette vitesse ne diffère de la précédente, qu'en ce que $-\,m'v'$ est remplacé par $+\,m'v'$.

Si on a $mv = m'v'$, il vient simplement :

$$u = \frac{2\,mv}{m + m'}.$$

§ 2. — CHOC DES CORPS PARFAITEMENT ÉLASTIQUES.

Soient toujours, comme plus haut, M et M' deux corps partis l'un du point A, l'autre du point B avec les vitesses v et v', et allant à la rencontre l'un de l'autre.

$$1^{\circ} \quad mv = m'v'$$

Dans ce cas, on a $F = F'$; les corps venant se choquer avec des quantités de mouvement égales, s'en retournent avec les vitesses primitives.

$$2^{\circ} \quad mv > m'v'$$

Nous donnons à la droite une vitesse u dans le sens de M, et nous avons sur la droite :

Vitesse de M . . . . . $v - u$

Vitesse de M' . . . . . $v' + u$ en sens contraire.

Faisons $m\,(v - u) = m'\,(v' + u)$

on a : $$u = \frac{mv - m'v'}{m + m'},$$

comme précédemment.

Après le choc sur la droite, les corps s'en retourneront chacun de leur côté avec les vitesses $u - v$ et $u + v'$. Mais comme la droite a u dans le sens de AB, la masse M aura dans l'espace la vitesse $v - u - u = v - 2u$ de B en A.

La masse M' aura dans l'espace la vitesse $v' + u + u = v' + 2u$ de A en B.

Cas où les corps vont dans le même sens.

Soit $v > v'$, et le mouvement dans le sens de AB, de gauche à droite.

Donnons une vitesse u à la droite pour laquelle on ait :

$$v > u > v'$$

La masse M aura pour vitesse sur la droite $v - u$;
La masse M' aura *idem*. *idem*. . $v' - u$;
dans le sens de AB, ou $u - v'$ dans le sens de BA.

Posons : $$m(v - u) = m'(u - v')$$

nous avons : $$u = \frac{mv + m'v'}{m + m'}.$$

Après le choc, les deux corps s'en retourneront en sens contraire avec les vitesses respectives $v - u$ et $u - v'$.

Mais la droite a u dans le sens de AB ; donc les vitesses seront :

pour M, de droite à gauche, $v - u - u = v - 2u$;
et par conséquent, de gauche à droite. . . . $2u - v$;
pour M', de gauche à droite, $u - v' + u = 2u - v'$.

§ 3. — CHOC DES CORPS SUR DES SURFACES INCLINÉES.

Soit M (*fig*. 63) un corps dirigé suivant BA, et rencontrant au point A une surface inclinée CD.

Décomposons sa vitesse v en deux, l'une suivant DA, l'autre suivant la perpendiculaire EA au point A. Soit α l'angle que forme AB avec AE.

Les composantes sont : $v \sin. \alpha$ suivant DA;
$v \cos. \alpha$ suivant EA.

1° *Corps mou.*

Au point A, la vitesse v cos. α est détruite par la résistance du plan normal ; il ne reste plus que la vitesse v sin. α.

Le corps continue donc à glisser le long du plan CD avec une vitesse v sin. α.

2° *Corps élastique.*

Arrivée au point A, v cos. α devient nulle, puis reprend de suite sa valeur en sens contraire ; v sin. α conserve toute la sienne. Le corps, après avoir touché le point A, prend une direction AB'.

Les composantes de la vitesse suivant AB', sont v sin. α suivant CD, et v cos. α' suivant AE, α' étant le nouvel angle que fait la direction du mobile avec la normale. Or, v cos. α' $= v$ cos. α ; donc, $\alpha' = \alpha$.

L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion pour les corps parfaitement élastiques.

3° *Corps imparfaitement élastique.*

Dans ce cas, l'angle de réflexion α'' est compris entre α' et 90°, puisqu'il ne peut être plus petit que le premier, ni plus grand que le second.

On peut juger de l'élasticité d'un corps d'après son angle de réflexion.

ARTICLE IV.

FORCE CENTRIFUGE ET FORCE CENTRIPÈTE.

Soit m (*fig.* 64) un point qui se meut dans un plan, de telle manière que sa distance au point c doit être constante et égale à R.

On appelle *force centrifuge*, la force en vertu de laquelle il tend constamment à prendre la direction de la tangente mt ; et *force centripète*, la force qui le retient à la distance cm du point c.

Le point m est donc sollicité par deux forces agissant l'une suivant mt, l'autre suivant mc.

Soit proposé de déterminer la force centripète, ou la force agissant suivant me.

Soit cette force.

Le point m est doué d'un mouvement uniforme avec une vitesse v.

Soit θ un temps infiniment petit, $v\theta$ est le chemin parcouru pendant ce temps.

Supposons que le corps, se mouvant suivant mt, aille pendant le temps θ de m en m', et se mouvant suivant mc, aille pendant le temps θ de m en i. Il est clair que, quand le corps sera sollicité en même temps par la force centrifuge et la force centripète, il prendra la direction et arrivera à l'extrémité de la diagonale du parallélogramme construit sur mi et mm'.

Joignons cm', le point n de rencontre de cm' avec la circonférence est précisément l'extrémité de cette diagonale.

En effet, θ étant infiniment petit, mm' et mi le sont aussi ; alors on peut considérer cm' comme parallèle à cm, sauf plus tard à y avoir égard.

Or, par hypothèse, le point m doit toujours être sur la circonférence, donc la parallèle menée par i à mm' rencontre cm' sur la circonférence, c'est-à-dire en n.

La force φ qui retient le mobile autour du point c est une accélératrice constante ; car, si elle cessait d'agir, le mobile prendrait la direction de la tangente mt de la première force.

Pour déterminer φ, on a la formule :

$$e = \frac{gt^2}{2}$$

dans laquelle : $e = mi$ $\quad g = \varphi$ $\quad t = \theta$

donc :

$$mi = \frac{\varphi\theta^2}{2}$$

Pour le mouvement uniforme suivant mt, on a :

$$mm' = v\theta^2$$

Eliminons mi et mm'.

Pour cela, remarquons que mm' étant une tangente, on a :

$$\overline{mm'}^2 = m'n\,(2R + m'n)$$

Or,

$$m'n = mi,$$

donc :

$$mi = \frac{\overline{mm'}^2}{2R + m'n} = \frac{v^2\theta^2}{2R + m'n}$$

Egalant entre elles les deux valeurs de mi, il vient :

$$\frac{\varphi\theta^2}{2} = \frac{v^2\theta^2}{2R + m'n}$$

d'où : $$\varphi = \frac{v^2}{R + \frac{1}{2} m'n}$$

Dans toutes les équations précédentes, on a supposé que θ avait une valeur finie ; si nous exprimons qu'il est infiniment petit, c'est-à-dire nul, l'erreur du parallélisme disparaît, et on a $m'n = 0$.

d'où $$\varphi = \frac{v^2}{R}$$

Telle est l'expression de la force centripète.

ARTICLE V.

FORCES VIVES.

On donne le nom de force vive d'un corps au *produit de la masse* de ce corps *par le quarré de sa vitesse.*

Principe.

La différence entre les forces vives d'un mobile considéré à deux époques différentes, est précisément égale au double de la quantité de travail effectué dans l'intervalle de ces deux époques.

Soit v la vitesse d'un corps en mouvement en un point donné de sa direction, sa force vive en ce point est $m v^2$.

Soit v' sa vitesse en un autre point, sa force vive est $m v'^2$.

La différence est $m v^2 - m v'^2$.

Soit T_m le travail effectué entre les deux points considérés, c'est-à-dire le produit de la force qui sollicite ce corps par le chemin qu'il a parcouru, on doit avoir :

$$m v^2 - m v'^2 = 2 T_m$$

En effet, soit P la force, et e l'espace parcouru, on a :

$$T_m = P \times e$$

Posons : $$v^2 - v'^2 = u$$

$$m v^2 - m v'^2 = m (v^2 - v'^2) = m u^2$$

or : $$u^2 = 2 g e \qquad m = \frac{P}{g}$$

donc : $$m u^2 = \frac{P}{g} 2 g e = 2 P e$$

ARTICLE VI.

FROTTEMENT.

Soit une masse m (*fig.* 65) d'un poids P, en repos sur un plan horizontal. La pression sur le plan est P. Appliquons une force horizontale T d'abord très-petite : le corps, ayant de l'adhérence contre le plan, restera en repos jusqu'à ce que T, croissant insensiblement, finisse par l'entraîner. Il y a, au moment où T entraîne le corps, une valeur de T égale à la résistance qu'opposait au mouvement l'adhérence de m sur le plan ; soit l cette valeur. Appelons en même temps F le frottement de m, c'est-à-dire la résistance que l'adhérence oppose à l ; on a : $F = l$.

Supposons maintenant que le corps se meut uniformément sur AB avec la vitesse v. Si on lui applique la force $T > l$, le mouvement sera accéléré. Si on applique $T = l$, le mouvement sera uniforme et égal à v par seconde. Si on applique $T < l$, alors le frottement étant plus grand que T, le mouvement se ralentira, cela d'autant plus vite que $F - T$ sera plus considérable. Pour $T = 0$, F agira tout entier en sens contraire du mouvement. Il faut donc, pour que le corps se meuve indéfiniment avec la vitesse v, que l'on applique constamment dessus une force égale et directement opposée à F.

Mesure du frottement.

Soit m (*fig.* 66) un corps placé sur un plan incliné faisant un angle α avec l'horizon.

Soit P le poids de ce corps que nous décomposons en deux f et N pour lesquels nous avons :

$$f = P \sin. \alpha$$
$$N = P \cos. \alpha$$

f tend à faire descendre le corps le long du plan, et N est détruite par la résistance du plan. Plus α est petit, plus f est petit aussi.

Le corps exerçant un frottement contre le plan incliné, reste en repos tant que f est plus petit que F, son frottement contre ce plan. Il résulte de là que si on soulève insensiblement le plan incliné de manière à augmenter petit à petit la valeur de l'angle α, il arrive un moment où f devenant plus grand que F, le corps entre en mouvement.

Pour déterminer F, il suffit de prendre la valeur de f im-

médiatement antérieure. Soit α' la valeur de l'angle α; dans ce cas, on a : $F = f = P \sin. \alpha'$.

On détermine α' pour tous les corps et on en déduit F.

On a trouvé ainsi les lois suivantes :

1° *Le frottement est indépendant de l'étendue de la surface en contact.*

2° *Le frottement est proportionnel à la pression qu'exercent les deux corps l'un contre l'autre.*

3° *Le frottement est d'autant plus petit que les surfaces en contact sont plus polies.*

4° *A poli égal, le frottement est plus considérable entre des surfaces homogènes qu'entre des surfaces hétérogènes.*

5° *Le frottement est d'autant moindre que la vitesse est plus considérable.*

Le frottement étant proportionnel à la pression, on peut le représenter ainsi :

$$F = KQ$$

Q étant la pression, K un coefficient que l'on détermine par expérience.

$$KQ = Q \sin. \alpha'.$$

LIVRE VIII.

PHYSIQUE INDUSTRIELLE.

Nous comprenons sous le nom de *physique industrielle*, l'étude spéciale des phénomènes qui se rattachent, dans les arts, aux deux opérations principales suivantes, savoir :

La combustion,
Le chauffage,

à chacune desquelles nous allons consacrer un chapitre spécial.

CHAPITRE PREMIER.

COMBUSTION.

ARTICLE Ier.

THÉORIE CHIMIQUE DE LA COMBUSTION.

La combustion est une oxidation ou combinaison d'un corps simple avec l'oxigène.

Suivant la nature du corps et la température de la combustion, les produits de cette dernière sont solides, liquides ou gazeux.

Un des principaux phénomènes de la combustion, c'est l'élévation de température qu'elle occasionne; cette propriété, qui se manifeste à des degrés variables, suivant la substance employée et la rapidité avec laquelle se fait le renouvellement des surfaces en contact, est, avec la lumière, produit aussi de la combustion, celle que l'on met le plus à profit dans les arts.

Dans ce cas, les corps simples, qui sont le plus propres à être employés, sont ceux que l'oxigène attaque le plus facilement.

Parmi ces derniers, il en est qui, pour des quantités égales de chaleur développée, à poids égal, coûtent plus cher les uns que les autres; les différences de prix de revient sont même tellement considérables que le nombre de ceux adoptés dans les arts se réduit à *un*, le *carbone*, principal composant des matières organiques, qui donne, par son oxidation, de l'acide

carbonique, gazeux jusqu'à des températures bien au-dessous de zéro.

100 parties en poids d'acide carbonique contenant :

Carbone.	27.36
Oxigène.	72.64
	100.00

la quantité d'oxigène nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de carbone est donnée par la proportion :

$$27.36 : 72.64 :: 1 : x = 2.^{k}655$$

L'oxigène s'extrait de l'air, dont il forme les 0.21 en volume, le reste étant occupé par l'*azote*, gaz simple incapable d'entrer en combinaison autrement qu'à l'état naissant. Le produit de la combustion, en supposant que tout l'oxigène a été absorbé, est un mélange d'acide carbonique et d'azote.

Un mètre cube d'air à 0°, sous la pression de $0.^{m}76$ de mercure, pèse $1.^{k}3$.

Un mètre cube d'oxigène, dans les mêmes circonstances de température et de pression, pèse $1.1026 \times 1.3 = 1.^{k}4334$.

Le poids d'oxigène nécessaire à la combustion de 1 kilog. de carbone étant $2.^{k}655$, le volume de cet oxigène à 0°, sous la pression $0.^{m}76$ de mercure, s'obtient en posant la proportion :

$$1.^{k}4334 : 1^{m.c.} :: 2.655 : x = \frac{2.655}{1.4334} = 1^{m.c.}85$$

Le nombre de mètres cubes d'air pesant $1.^{k}3$ nécessaires à la combustion de 1 kilog. de carbone, s'obtient en posant la proportion :

$$0.21 \text{ oxig.} : 1 \text{ air} :: 1.85 \text{ oxig.} : x \text{ air.}$$

$$x = \frac{1.85}{0.21} = 8^{m.c.}800$$

Un mètre cube d'acide carbonique pèse $1.5245 \times 1.3 = 1.^{k}982$, à 0°, sous la pression $0.^{m}76$ de mercure. Il contient 72.64 p. 100 d'oxigène; donc :

$$1.982 \times 0.7264 = 1.^{k}4334$$

Or, ce poids $1.^{k}4334$ d'oxigène contenu dans un mètre cube d'acide carbonique est précisément le poids de un mètre cube

de ce gaz. On conclut de là que, chimiquement, il n'y a pas augmentation de volume par la combustion du carbone.

L'unité de chaleur étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever un kilogramme d'eau de 1 degré, un kilogramme de carbone pur émet, en brûlant, 7500 unités de chaleur; du moins, on le suppose d'après les expériences qui ont été faites à ce sujet.

Suivant la pureté des combustibles au moyen desquels s'opère la combustion, ce nombre varie considérablement. Ainsi, les principaux combustibles employés dans les arts, classés par ordre de pureté, sont les suivants :

	Puissance calorifique de 1 kilog.	
1° Charbon de bois.	7500	unités de chaleur.
2° Coke, charbon de houille. . .	7300	*idem.*
3° Charbon de tourbe.	7200	*idem.*
4° Houille.	7000	*idem.*
5° Bois sec.	3500	*idem.*
6° Tourbe.	3000	*idem.*

Parmi ces six substances, trois brûlent complètement, ce sont : le *charbon de bois*, le *coke* et le *charbon de tourbe;* les trois autres dégagent de la fumée ou mélange de carbone en poussière excessivement fine, avec divers produits hydrogénés provenant d'huiles essentielles contenues dans le combustible, susceptibles d'être brûlées aussi, mais à certaines conditions qu'on ne peut toujours remplir.

Les prix de revient de l'unité de chaleur produite par ces différents combustibles, sont, en moyenne, à Paris :

Charbon de bois	2.77
Coke	1.54
Charbon de tourbe.	1.30
Houille	1.00
Bois.	1.33
Tourbe.	1.10

La quantité d'air lancé dans les foyers par kilogramme de carbone brûlé, n'est jamais la même que celle théoriquement nécessaire pour produire sa combustion ; elle est beaucoup plus grande, cela, parce que l'oxigène étant très-disséminé dans l'air, ne peut être absorbé complètement dans son passage à travers le combustible.

D'après les quelques expériences qui ont été faites à ce sujet, la quantité d'air nécessaire à la combustion de un ki-

logramme de carbone, ne dépasserait pas 25 mètres cubes, et est en général de 18 mètres cubes pesant 23 kilog. Mais il n'y a rien de positif dans cette donnée, en ce qu'elle varie suivant les formes et dimensions des foyers (1).

ARTICLE II.

THÉORIE PHYSIQUE DE LA COMBUSTION.

Considérée sous le point de vue physique, la combustion est une production continue de chaleur, résultant du contact d'un corps embrasé avec un *courant* d'air pur.

Ce courant d'air peut être produit de deux manières différentes.

(1) Les appareils où des expériences sur cette matière seraient le plus faciles à faire, sont les chaudières de *locomotives*, parce que les dimensions et formes de ces dernières sont à peu près constantes. Il est probable que pour des vitesses différentes, imprimées à l'air, on obtiendrait des résultats différents, non-seulement sur la *quantité d'air employé*, mais encore sur sa *température* à la sortie du foyer, deux renseignements indispensables à la détermination du maximum d'effet utile que l'on peut retirer de 1 kilogramme de carbone brûlé.

En effet, tout le monde sait que pour activer la combustion, il faut renouveler plus souvent les surfaces en contact, c'est-à-dire accélérer la vitesse de l'air qui traverse le combustible; ce fait découle naturellement du phénomène chimique qui se passe pendant la combustion. Un autre fait non moins important, et que tout le monde connait aussi, c'est que l'activité de la combustion, qui amène nécessairement une augmentation de chaleur produite dans un temps donné, engendre un accroissement de température. Or, cet accroissement de température ne peut être attribué qu'à l'une des trois causes suivantes :

1o *Ou la quantité d'air, nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de carbone, restant constante, quelle que soit sa vitesse, la quantité de chaleur emportée par lui hors du foyer, est en raison inverse de cette vitesse.*

2o *Ou la quantité de chaleur absorbée par l'air restant constante, quelle que soit sa vitesse, la quantité d'air consommée par 1 kilogramme de carbone est en raison inverse de cette vitesse.*

3o *Ou la quantité d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de carbone ainsi que la quantité de chaleur absorbée par cet air étant quelconques, la vitesse de transmission, du calorique produit aux surfaces environnantes, croît dans une moindre proportion que ce calorique.*

Il est probable que les trois effets ont lieu en même temps, c'est-à-dire que la chaleur emportée par l'air est d'autant moindre que la vitesse est plus grande, parce qu'il a moins de temps pour s'échauffer; que la quantité d'air employée à la combustion de 1 kilogramme de carbone est moindre aussi, parce que, la température étant plus élevée, l'affinité des deux corps simples l'un pour l'autre est plus grande; qu'enfin, la faculté conductrice des métaux étant, d'après la loi de Newton, proportionnelle à la différence des températures des milieux environnants, la quantité de chaleur par la surface du vase chauffé au liquide qu'il renferme dans un temps donné n'augmente que quand la température du foyer a d'abord augmenté.

Il résulte de là que l'on doit produire la combustion avec le plus d'activité possible, pour avoir le plus de chaleur possible utilisée par rayonnement du combustible brûlant. Et c'est à absorber le plus possible de chaleur rayonnante que l'on doit tendre, car celle emportée par l'air hors du foyer n'est que très-imparfaitement communiquée aux surfaces qu'on lui fait lécher dans son passage à travers les canaux de circulation.

Mais de l'accroissement de vitesse imprimée à l'air, résulte augmentation de travail à dépenser pour produire cette vitesse. Il y a une limite à déterminer, ce qui ne peut se faire que par expérience. Nous examinerons plus loin les travaux de notre savant professeur M. *Péclet*, pour arriver à ce résultat.

1° Par un procédé mécanique qui consiste soit à *souffler* de l'air sur le combustible, soit à *aspirer* de l'air en le forçant à passer au travers des matières en combustion.

2° Par un procédé physique, appelé *tirage*, basé sur la propriété qu'ont les gaz échauffés de se dilater, et agissant par aspiration comme le second procédé mécanique.

Ces deux moyens d'alimenter la combustion, ont été employés de tout temps, mais généralement pour satisfaire à des conditions différentes. Ainsi, le soufflage ou inspiration s'emploie spécialement pour activer la combustion, et l'aspiration pour l'entretenir.

Aujourd'hui que les puissances mécaniques sont faciles à se procurer partout où il y a production de chaleur, nous croyons devoir résoudre le problème de l'alimentation de la combustion par la solution des trois questions suivantes :

1° *Quel est le travail à dépenser pour brûler* 1 *kilogramme de carbone dans un temps donné?*

2° *Y a-t-il plus d'économie à produire ce travail en renouvelant l'air par inspiration que par aspiration?*

3° *Y a-t-il plus d'économie à produire le tirage par un procédé mécanique que par le procédé physique?*

§ 1er. — QUEL EST LE TRAVAIL NÉCESSAIRE POUR PRODUIRE LA COMBUSTION DE 1 KILOGRAMME DE CARBONE DANS UN TEMPS DONNÉ?

Nous avons dit que la quantité d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de carbone variait entre 18 et 25 mètres cubes. Nous avons dit également que l'on ignorait si cette quantité était constante, quelle que soit la rapidité avec laquelle s'opère la combustion.

Soit ABCD (*Pl.* III, *fig.* 5) un cylindre indéfini dans lequel se meut un piston P fixé à l'extrémité d'une tige.

Soit F un foyer rempli de combustible embrasé, formant l'une des extrémités du cylindre ABCD. L'espace compris entre le piston P et le foyer F est rempli d'air non brûlé.

Le cylindre étant indéfini, nous pouvons supposer que le piston se meut indéfiniment, soit en partant du foyer et allant sans cesse en s'en éloignant, soit en partant d'une distance indéfinie du foyer et allant sans cesse en s'en rapprochant.

Dans le premier cas, l'air se raréfiant entre le foyer et le piston, par suite de la différence de pression qui a lieu, l'air extérieur traverse le combustible et vient se loger

dans l'espace compris entre ce dernier et le piston en quantité égale au volume engendré par le mouvement du piston, et il y a tirage par *aspiration*.

Dans le second cas, l'air compris entre le piston et le foyer se trouvant comprimé, par suite de la différence de pression qui a lieu, cet air traverse le combustible et s'échappe du cylindre, et il y a tirage par *inspiration*.

Appelons : P le poids d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de carbone;

T, le temps, en *secondes*, employé à la combustion de *id*;

b, la pression barométrique, extérieure, en mercure;

h, l'excédant de pression nécessaire pour que l'air traverse le combustible avec la vitesse *v*;

t, la température de l'air entre P et F.

Quel que soit le sens du mouvement du piston, la pression extérieure sur le piston et sur le foyer est constante et égale à *b*.

Lorsque le piston va en s'éloignant du foyer, la pression intérieure est $b - h$, et l'écoulement a lieu en vertu de la différence

$$b - (b - h) = h.$$

Lorsque le piston va en se rapprochant du foyer, la pression intérieure est $b + h$, et l'écoulement a lieu en vertu de la différence

$$b + h - b = h;$$

c'est-à-dire *h* dans les deux cas.

Le poids de 1.m c. d'air à 0°, sous la pression 0.m76, est 1.k3

Or, il est un principe de physique générale qui dit que les volumes des gaz sont *proportionnels aux poids*, *en raison inverse des pressions*, *et proportionnels aux températures*, ce qui donne pour deux volumes V et V' :

$$V = V' \frac{P}{P'} \times \frac{\beta'}{\beta} \times \frac{(1 + a\,t)}{(1 + a\,t')}$$

a étant le coefficient de dilatation des gaz, et égal à 0,00366

Faisant dans cette formule :

$$V' = 1^{m.c.}00$$
$$P' = 1.^{k}30$$
$$\beta' = b$$
$$\beta = b \pm h$$
$$t = 0^{0}$$

Nous avons :

$$V = \frac{P}{1.3} \times \frac{b}{b \pm h} (1 + at) \ldots \ldots (1)$$

Telle est l'expression du volume de l'air, compris entre le piston et le foyer, nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de carbone.

Le travail employé par le piston à faire passer cet air au travers du combustible, est :

$$S \times v \times T \times h \times 13590,$$

S étant la surface du piston,
v sa vitesse par seconde,
T le temps employé,
h la différence entre les pressions intérieure et extérieure en mercure;
13590 la densité du mercure.

Or, SvT n'est autre que le volume engendré par le piston pendant le temps T, lequel volume est précisément égal à V : on a donc, pour expression du travail dépensé pour opérer la combustion de 1 kilogramme de carbone, abstraction faite du frottement du piston :

$$T_m = \frac{P}{1.3} \times \frac{b}{b \pm h} (1 + at)\, h \times 13590 \quad (2)$$

et, par aspiration :

$$T'_m = \frac{P}{1.3} \times \frac{b}{b - h} (1 + at)\, h \times 13590;$$

par inspiration :

$$T''_m = \frac{P}{1.3} \times \frac{b}{b + h} (1 + at)\, h \times 13590.$$

Lorsque le tirage a lieu par aspiration, t est la température de l'air, quand il a passé par le foyer et les divers canaux de circulation destinés à transmettre aux corps que l'on chauffe une partie de la chaleur qu'il a emportée avec lui.

Lorsque le tirage a lieu par inspiration, t est la température de l'air extérieur.

Si on veut avoir le travail par seconde, afin de pouvoir

l'exprimer en chevaux, il suffit de diviser cette valeur de T_m par T, temps employé, ce qui donne :

$$\frac{T_m}{T} = \frac{P}{1.3} \times \frac{b}{b \pm h} (1 + at) \frac{h}{T} 13590$$

P varie entre 20 et 25 kilogrammes, dans les foyers bien construits.

Si tout l'oxigène contenu dans l'air qui traverse le foyer pouvait être converti en acide carbonique, P ne serait que $8.8 \times 1.3 = 11.^k45$.

b est généralement égal à $0.^m76$.

t est 10° en moyenne pour le tirage par inspiration, et varie entre 200 et 400° pour le tirage par aspiration.

h est une quantité qui se détermine par expérience. Elle dépend du frottement de l'air à travers le combustible. Ce frottement est d'autant plus considérable que :

1° Le combustible est plus serré ;

2° La vitesse de l'air est plus considérable ;

3° L'épaisseur du combustible est plus grande.

Or, voici ce qui a lieu généralement :

Dans les foyers ordinaires, où l'on brûle de la houille, on donne à la surface de la grille $0.^{mq}15$ pour chaque 10 kilogrammes de houille brûlés par heure.

Dans les locomotives, où l'on brûle du coke, on donne à la surface de la grille $0.^{mq}02$ par chaque 10 kilogrammes de coke brûlés par heure.

L'épaisseur de la houille sur la grille est de $0.^m08$; celle du coke, $0.^m60$.

Si nous faisons les produits des surfaces de grilles par les hauteurs du combustible, nous obtenons les volumes accordés dans les foyers aux mêmes quantités de combustible brûlées par heure :

Or, $0.^{mq}15 \times 0.^m08 = 0.^{mc}012$
$0.^{mq}02 \times 0.^m60 = 0.^{mc}012$

Ces volumes sont égaux, ce qui indique, en passant, que la densité du coke étant moitié de celle de la houille, on charge deux fois en coke pour une fois en houille, à poids égaux brûlés dans le même temps.

D'autre part, le frottement de l'air contre le combustible qu'il traverse ne dépend pas seulement de la section primitive d'écoulement à travers ce combustible, mais du nombre infini

de sections d'écoulement qu'il affecte depuis son entrée jusqu'à sa sortie dans la masse en combustion. C'est pourquoi nous considérons la résistance qu'oppose cette masse au mouvement de l'air qui la traverse, non comme en raison inverse de sa section, pour une même quantité brûlée dans un même temps, mais comme en raison inverse de son volume, c'est-à-dire le produit de cette section par l'épaisseur de la masse.

Or, ce produit est le même pour les foyers ordinaires et pour les locomotives, où les genres de chauffage sont tout différents.

Nous en concluons que la valeur de h, pour tous les appareils de chauffage, quels qu'ils soient, doit être considérée comme *constante*, car elle l'est là où la combustion est aussi bien dirigée que possible.

Cette assertion est, du reste, facile à vérifier, au moyen d'un manomètre placé :

1° Sous le cendrier, *fermé*, d'une locomotive marchant à sa vitesse ordinaire;

2° Sous le cendrier, *fermé*, d'une chaudière à vapeur dont le foyer serait bien construit.

On déterminerait ainsi, non seulement les valeurs relatives de h, dans les deux cas, que nous supposons égales, mais encore leurs valeurs réelles, ce qui serait d'autant plus important qu'on n'a que des données très-vagues sur ce point.

Suivant nous, cette valeur de h serait comprise entre 2 et 4 centimètres de mercure; moyenne, 3 centimètres.

Nous verrons plus loin quelle force il est nécessaire de dépenser, en admettant ce chiffre, suivant les deux systèmes de tirage.

§ 2. — Y A-T-IL PLUS D'ÉCONOMIE A PRODUIRE LE TIRAGE PAR INSPIRATION QUE PAR ASPIRATION?

Nous avons :

$$T_m = \frac{P}{1.3} \times \frac{b}{b \pm h} (1 + at)\, h \times 13590.$$

D'abord, $+h$ au dénominateur correspondant au tirage par inspiration, et $-h$ au tirage par aspiration, nous voyons que le dénominateur de la fraction $\frac{b}{b \pm h}$ augmentant, cette fraction diminue, et réciproquement; d'où même résultat pour T_m, qui suit les mêmes phases que cette fraction.

Mais ce n'est pas là qu'est la plus grande différence, c'est à la valeur de t.

En effet, si on peut arriver à faire en sorte que la température de la fumée sortant du foyer et des canaux de circulation soit égale à la température extérieure, alors la seule différence entre les quantités d'action dépensées roule sur la fraction $\frac{b}{b \pm h}$. Mais tels que les appareils de chauffage sont construits aujourd'hui, la fumée qui sort des canaux de circulation est à une température d'au moins 200°, et s'élève, comme dans les locomotives, jusqu'à 400°; moyenne, 300°.

La température extérieure, au contraire, varie entre — 10 et + 30° centigrades; moyenne, + 10°.

Il en résulte que le facteur $1 + at$, proportionnel au travail dépensé, est:

Dans le premier cas, $1 + 0.00366 \times 300 = 2.098$;

Dans le second cas, $1 + 0,00366 \times 10 = 1,0366$, c'est-à-dire plus que double, dans le premier cas, que dans le second.

Admettant pour h la valeur 0.m04, il vient :

Tirage par inspiration :

$$T_m = \frac{P}{1.3} \times \frac{0.76}{0.80} \times 1.0366 \times 0.04 \times 13590$$

$$= 410 \text{ P kilogrammètres.}$$

Faisons P = 20 kil., c'est le minimum de valeur qu'il puisse avoir, on a :

$$T_m = 410 \times 20 = 8200 \text{ kilogrammètres.}$$

Tirage par aspiration :

$$T_m = \frac{P}{1.3} \times \frac{0.76}{0.72} \times 2.098 \times 0.04 \times 13590$$

$$= 924 \text{ P kilogrammètres,}$$

et en faisant P = 20 kilogrammètres :

$$T_m = 924 \times 20 = 18480 \text{ kilogrammètres.}$$

Exemple.

Dans les locomotives, on brûle 400 kilogrammes de coke par heure, donc 1 kilogramme en $\frac{3600}{400} = 9$ secondes.

Faisant T = 9,

Le travail nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de coke étant, pour 9 secondes :

1° Par inspiration.. . . . . 8200 kilogrammètres;

2° Par aspiration .. . . 18480 *id.*

pour une seconde, il sera :

$$1^\circ\ \frac{8200}{9} = 911.11^{\text{km.}} = \frac{911.11^{\text{chev.}}}{75} = 12.2^{\text{chev.}};$$

$$2^\circ\ \frac{18480}{9} = 2053.33^{\text{km.}} = \frac{2053.33^{\text{chev.}}}{75} = 27.50^{\text{chev.}}.$$

Dans le premier cas, le travail absorbé pour le tirage est de 12 chevaux $\frac{1}{5}$.

Dans le second cas, ce travail est de 27 chevaux $\frac{1}{2}$, abstraction faite des frottements dans les tubes qui exigent pour *h* une plus forte valeur que 3 centimètres.

Devant un pareil résultat, ne sent-on pas l'importance qu'il y aurait à produire le tirage, dans ces machines, par inspiration, au moyen d'appareils particuliers.

§ 3. — Y A-T-IL PLUS D'ÉCONOMIE A PRODUIRE LE TIRAGE PAR UN PROCÉDÉ MÉCANIQUE QUE PAR UN PROCÉDÉ PHYSIQUE?

Nous avons déterminé, ci-dessus, la quantité de force qu'il fallait dépenser pour opérer la combustion de 1 kilogramme de carbone, par un procédé mécanique. Nous allons maintenant rechercher la quantité de chaleur à dépenser pour opérer cette combustion par un procédé physique.

Nous dirons tout d'abord que s'il ne s'agissait que du tirage par aspiration à 300° de chaleur, le problème serait résolu d'avance, puisque cette température suffit pour produire le tirage physique. Il faut donc admettre la situation suivante :

Un foyer et un appareil de chauffage sont construits de telle manière que la fumée peut sortir des canaux de circulation à 10° ou à 300°, à volonté; on demande s'il y a plus d'économie à produire le tirage mécaniquement en utilisant toute la chaleur développée, que physiquement en perdant la chaleur contenue dans l'air sortant à 300°.

SOLUTION.

Théorie des cheminées.

Le tirage physique s'opère au moyen d'appareils appelés cheminées.

Une cheminée est un tube vertical à section quelconque que l'on place à la suite des canaux de circulation de l'air chaud sortant d'un foyer. L'effet de ce tube vertical est d'aspirer l'air, absolument comme le ferait un piston se mouvant dans un cylindre.

Pour démontrer quelles sont les causes qui produisent cet effet ascendant sur l'air chaud qui entre dans les cheminées, soit AB (*fig.* 6) une cheminée placée au-dessus d'un foyer A.

L'air en contact avec ce foyer s'échauffe et se dilate ; à volume égal il devient plus léger que l'air non chauffé, et en vertu du principe de physique générale qui dit que : *un corps plongé dans un fluide perd en poids le poids d'un égal volume du fluide déplacé*, cet air tend à s'élever avec une vitesse d'autant plus grande que la différence des densités est plus considérable.

Soient P le poids de l'air chaud contenu dans la cheminée ; P' le poids d'un égal volume d'air froid, l'air chaud est sollicité de bas en haut par une force égale à P'—P.

Si nous remarquons en outre que la pression atmosphérique va en décroissant à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol, cette pression est moindre à la partie supérieure qu'à la partie inférieure de la cheminée. Appelant p la différence en kilogr. entre les pressions de l'atmosphère sur les sections inférieure et supérieure de la cheminée, l'air chaud est aussi sollicité de bas en haut par la force p. Donc, au total, il s'élève en vertu de la pression :

$$P'-P+p.$$

Plus l'air est chaud, plus P est petit, plus, par conséquent, la force *a* ascensionnelle est grande.

Vitesse d'écoulement.

Soient CDEF (*fig.* 7) un siphon renversé, et *a* un diaphragme placé dans l'intérieur de ce siphon. Menons l'horizontale AB, et supposons que les volumes compris entre AB et *a*, dans chacune des branches, sont égaux.

Remplissons la branche AD *a* d'air à t^o, et la branche BE *a* d'air à t'^o.

A volumes égaux, pressions égales, les densités sont en raison inverse des températures :

$$d : d' :: 1 + at' : 1 + at.$$

Soit $t < t'$; chauffons la branche AD à la température t'. Son volume augmente, et si l est la longueur AD a, le siphon étant supposé cylindrique, on obtient la longueur l' correspondante au nouveau volume, en remarquant que à poids égaux les volumes sont proportionnels aux températures; d'où :

$$l' : l :: 1 + at' : 1 + at;$$

et :

$$l' = \frac{l(1 + at')}{1 + at} = \mathrm{CD}a.$$

Les fluides contenus dans les deux branches étant homogènes, le niveau tend à s'établir avec une vitesse ayant pour hauteur génératrice C A ; d'où :

$$v = \sqrt{2g \times \mathrm{AC}}.$$

Soit $\mathrm{BE} = \mathrm{AD} = h$,
$\mathrm{AC} = h'$,

on a :

$$h' = l' - l = l\left(\frac{1 + at'}{1 + at} - 1\right)$$

Faisant $l = h$, ce qui a lieu si $\mathrm{DE} = 0$;

$$h' = h\left(\frac{1 + at'}{1 + at} - 1\right)$$

la fraction $\frac{1 + at'}{1 + at} = 1 + a(t' - t) - \frac{a^2 t(t' - t)}{1 + at}$

Or, a est le quarré de 0,00366, ou 0,0000134. Son produit par $\frac{t(t' - t)}{1 + at}$ est une quantité excessivement petite, quels que soient d'ailleurs t et t'; il en résulte que l'on peut négliger le terme tout entier et poser :

$$h' = h(1 + a(t' - t) - 1) = ha(t' - t)$$

Remplaçant h' par cette valeur, dans l'expression de v, nous avons :

$$v = \sqrt{2gha(t' - t)}$$

Cette formule est exacte, en tant que l'air de la cheminée a la même densité que l'air extérieur à la même température. Mais dans les cheminées il n'en est généralement pas ainsi, puisqu'une portion de l'oxigène a été convertie en acide carbonique. Alors la hauteur génératrice de la vitesse n'est pas réellement h', mais h'', que nous obtiendrons de la manière suivante :

Soient d la densité de l'air à 0° ;

d' la densité du mélange de gaz de la cheminée, à la même température.

A poids égaux, les volumes sont en raison inverse des densités ; donc le volume $h+h'$ de la branche CD, à la densité d, exprimé en gaz de la branche BE, à la densité d', sera :

$$V : V' :: d' : d$$

ou

$$h+h' : h+h'' :: d' : d$$

ou

$$h+h'' = \frac{d\,(h+h')}{d'}$$

Remplaçant h' par sa valeur :

$$h+h'' = \frac{d}{d'}\,h\,\left(a\,(t'-t)+1\right)$$

d'où :

$$h'' = \frac{dh}{d'}\left(1+a\,(t'-t)\right)-h$$

La densité d de l'air étant 1, celle du mélange d'air et d'acide carbonique s'obtient en remarquant que sur 18.$^{m.c.}$ qui passent dans la cheminée, 8.$^{m.c.}$ 8 seulement ont leur oxigène converti en acide carbonique, c'est-à-dire un poids de 2.^{k}655 converti en un de $\frac{1.982 \times 2.655}{1.4334} = 3.^{k}680$; différence 1.^{k}025.

18.$^{m.c}$ d'air pur pèsent 23.^{k}4.

18.$^{m.c}$ d'air mélangé pèsent 23.4 + 1.025 = 24.425.

d'où : $23.4 : 24.425 :: 1 : x = 1.044$

et

$$h'' = \frac{h}{1.044}\left(1+a\,(t'-t)\right)-h.$$

Or, $\frac{h}{1.044} - h = -0.042\,h$, que l'on peut négliger ;

donc : $$h'' = h\,a\,(t' - t)\,\frac{1}{1.044}$$

et $$v = \sqrt{2gh\,a\,(t' - t)\,\frac{1}{1.044}}$$

En multipliant cette valeur de v par la section du siphon, on a le volume théorique écoulé par seconde.

Pour obtenir le volume réellement écoulé, on est tenté, au premier abord, de multiplier la valeur du volume théorique par l'un des coefficients donnés par M. d'*Aubuisson* pour l'écoulement des gaz.

Mais ici, ces coefficients sont en défaut, comme l'a prouvé M. *Péclet*, dans de nombreuses expériences qu'il a faites à ce sujet.

Ainsi, ce savant physicien a trouvé que là où la vitesse théorique était :

1°	8.m17, la vitesse réelle était. . .	1.m52
2°	8.m94.	1.m76
3°	10.m49.	1.m96

Après de semblables résultats, il devint indispensable de déterminer les frottements qui avaient lieu dans les tuyaux. C'est M. *Péclet* qui entreprit ce difficile travail dont, après dix-huit cents expériences faites sur des tuyaux de toutes *longueurs*, de tous *diamètres* et de toutes *natures*, il déduisit les principes suivants :

1° *La pression atmosphérique inférieure est détruite en grande partie par le frottement.*

2° *En admettant que la perte de pression est proportionnelle à la longueur du tuyau, en raison inverse de son diamètre, proportionnelle au quarré de la vitesse d'écoulement et à un coefficient* k *dépendant de la nature de la cheminée*, on a :

P = pression en vertu de laquelle le gaz tend à monter ;
p = pression en vertu de laquelle il monte réellement.

P — p est la pression absorbée par les frottements.

Soit $$P - p = K\,\frac{v^2\,L}{D}$$

D et L étant le diamètre et la longueur.

On en déduit :

$$p = P - \frac{K v^2 L}{D}$$

Or, on a : $v = \sqrt{2gp}$

Remplaçant p par sa valeur :

$$v = \sqrt{2g\left(P - \frac{K v^2 L}{D}\right)}$$

Tirant la valeur de K de cette expression, il vient :

$$K = \frac{2g P D - v^2 D}{2g L v^2}$$

Si l'hypothèse que nous avons faite est bonne, pour des tuyaux de même nature, quels que soient leurs longueurs et diamètres, on devra toujours avoir la même valeur pour K. Or, l'expérience a prouvé que, dans ce cas, les valeurs de K étaient sensiblement égales entre elles, d'où M. *Péclet* a conclu que l'on pouvait admettre, pour K, les valeurs suivantes :

Cheminées en	terre cuite. . . .	K = 0,01275
—	tôle.	0,0051
—	fonte.	0,00255

Résolvant, par rapport à v, l'équation :

$$v = \sqrt{2g\left(P - \frac{K v^2 L}{D}\right)}$$

il vient :

$$v = \sqrt{\frac{2gPD}{D + 2gKL}}$$

et comme le gaz qui s'écoule dans les cheminées a pour densité 1.044, on mettra, comme précédemment :

$$v = \sqrt{\frac{2gPD}{D + 2gKL} \times \frac{1}{1.044}}$$

d'où les formules suivantes, en remplaçant P par sa valeur $ha\,(t' - t)$.

1° Air pur.

Terre cuite. $v = 9.12\sqrt{\frac{ha(t'-t)D}{L+4D}}$

Tôle.... $v = 14.43\sqrt{\frac{ha(t'-t)D}{L+10D}}$

Fonte.... $v = 20.41\sqrt{\frac{ha(t'-t)D}{L+20D}}$

2° Air brûlé.

Terre cuite.. $v = 8.85\sqrt{\frac{ha(t'-t)D}{L+4D}}$

Tôle..... $v = 14.00\sqrt{\frac{ha(t'-t)D}{L+10D}}$

Fonte.... $v = 19.80\sqrt{\frac{ha(t'-t)D}{L+20D}}$

Telles sont les six formules importantes qu'a déduites M. *Péclet* de ses longues et difficiles observations.

Valeur de t'.

Nous avons désigné par t' la température de l'air brûlé dans la cheminée.

Cette température, comme il est facile de le vérifier, va sans cesse en décroissant depuis la partie inférieure jusqu'à la partie supérieure, et cela d'autant plus promptement que la substance des cheminées est plus mince et plus conductrice de la chaleur. t' est donc la température moyenne.

Pour déterminer t', nous avons les formules suivantes qui ont été trouvées par expérience :

Soient T' la température au sommet;
T *idem* à la base;
D le diamètre;
e l'épaisseur moyenne;
v la vitesse d'écoulement.

1° Terre cuite.

$$\text{Log. } T' = \text{Log. } T - \frac{0.0000\,61\ L}{D e v}$$

2° Tôle de 0.m001 d'épaisseur.

$$\text{Log. } T' = \text{Log. } T - \frac{0.0135\ L}{D v}$$

3° Fonte de 0.m01 d'épaisseur.

$$\text{Log. } T' = \text{Log. } T - \frac{0.0243\ L}{D v}$$

Connaissant T, on détermine T' par l'une des trois formules ci-dessus, et on en déduit t', température moyenne, en posant :

$$t' = \frac{T + T'}{2}$$

La température de l'air extérieur étant toujours très-petite par rapport à t', on peut la supposer égale à zéro.

Alors : $$t' - t = \frac{T + T'}{2}.$$

Pour trouver la vitesse d'écoulement, on procède de la manière suivante :

Soit proposé de trouver la vitesse d'écoulement dans une cheminée en terre cuite :

on a : 1° $\text{Log. } T' = \log. T - \dfrac{0.000061\ L}{D e v}$

2° $v = 8.85 \sqrt{\dfrac{P D}{L + 4 D}}$

3° $P = h a (t' - t) = 0.00366\ h\ \dfrac{T + T'}{2}$

Si on pouvait éliminer T', le problème serait résolu. Mais cette élimination est trop difficile, et il vaut mieux avoir recours à un autre moyen.

Supposons T' = T, nous déduisons pour P une valeur qui, substituée dans la seconde équation, donne une valeur correspondante pour v. Substituant alors la valeur de v dans la

première, nous obtenons pour T' une valeur autre que T, que nous substituons dans P, puis ce nouveau P dans v, puis le nouveau v dans P, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la valeur de T' ne varie plus. Arrivé à ce point, on substitue cette valeur de T' dans l'expression de P, d'où on déduit v.

Détermination des dimensions des cheminées.

Soient : A le volume d'air chaud qui doit sortir par seconde;

p le nombre de kilogrammes de houille que l'on doit brûler par heure, et 20 le nombre de mètres cubes d'air froid, nécessaires à la combustion de 1 kilogramme, suivant M. *Péclet*.

$\frac{p \times 20}{3600}(1 + at')$ est le volume d'air chaud sortant par seconde de la cheminée, à la température moyenne de cette dernière.

On a donc : $$A = \frac{p \times 20}{3600}(1 + at') \quad \ldots \quad (1)$$

Soient : D le côté du quarré de la section supérieure de la cheminée;

v la vitesse d'écoulement de l'air brûlé.

On a : $D^2 v = A$ d'où : $v = \frac{A}{D^2}$

Remplaçant v par sa valeur, pour terre cuite par exemple, il vient, en négligeant le terme $4D$ qui est très-petit :

$$\frac{A^2}{D^4} = (8.85)^2 \frac{PD}{L}$$

et : $$L A^2 = (8.85)^2 PD^5$$

d'où : $$D = \sqrt[5]{\frac{L A^2}{(8.85)^2 P}}$$

et : $\log. D = \frac{1}{5}(2 \log. A + \log. L - 2 \log. 8.85 - \log. P) \ldots (2)$

A est déterminé par la formule (1).

L est la longueur totale parcourue par la fumée, longueur que l'on a soin d'augmenter un peu à cause du terme $4D$ que l'on a négligé.

Il est inutile d'indiquer les formules pour obtenir D, lorsque la cheminée est en tôle ou en fonte, car la marche à suivre est

absolument la même que pour la terre cuite ; les valeurs de v et t' seules changent.

Telles sont les formules importantes obtenues par M. *Péclet*, pour la détermination du diamètre supérieur d'une cheminée ; nous avons conservé les mêmes lettres que celles qu'il emploie lui-même, afin de ne pas déranger les habitudes des personnes qui s'en servent ordinairement, comme nous, et n'ont eu, bien certainement, que des occasions de s'en féliciter.

Discussion.

La formule générale pour trouver la vitesse d'écoulement est :

$$v = \sqrt{2g\,ha\,(t'-t)\frac{1}{1.044} \times \frac{D}{D + 2g\,KL}}$$

Si l est la longueur des canaux de circulation de la fumée, avant de se rendre à la cheminée, on a :

$$L = h + l$$

On peut se proposer de résoudre la question suivante :

Est-il une valeur de h pour laquelle v est *maxima ?*

Cette question est très-importante, en ce sens qu'il pourrait arriver que, par suite des frottements de l'air dans la cheminée, il y ait inconvénient plutôt qu'avantage à donner à cette dernière une grande hauteur.

Cette question serait facile à résoudre si le facteur $t' - t$ était indépendant de h, et dans ce cas on trouverait que plus h est grand, plus v est aussi considérable, à diamètre égal ; mais le facteur $t' - t$ variant avec les différentes valeurs de h d'une manière qui rend impossible la substitution, dans l'équation, de sa valeur en fonction de h, il n'y a que par des exemples que l'on peut résoudre cette question.

Soit donc une cheminée en terre cuite, nous avons, toutes réductions faites :

$$v = 8.85\sqrt{\frac{ha\,(t'-t)D}{l + h + 4D}}$$

$$\text{Log. } T' = \text{log. } T - \frac{0.000061\,(l + h)}{Dav}$$

Soient : $h = 10.^{m}00$

$D = 0.\ 50$

$$l = 10.^{m}00$$
$$e = 0.\ 20$$
$$T = 400.^{o}00$$

Nous supposons $T' = T$, ce qui donne :

$$t' - t = 400^{o}$$

et : $$v = 8.85 \sqrt{\frac{10 \times 0\ 00366 \times 400 \times 0.50}{20 + 2}}$$

$$= 5.^{m}12$$

d'où : $$\log. T' = 2.602 - \frac{0.000061 \times 20}{0.50 \times 0.20 \times 5.12}$$

$$T' = 398^{o}.$$

il n'y a pas de refroidissement sensible.

Soit maintenant $h = 20^{m}$.

Nous supposons toujours $T' = T$ en commençant ;

alors : $$v = 8.85 \sqrt{\frac{20 \times 0.00366 \times 400 \times 0.50}{30 + 2}}$$

$$= 6.^{m}00$$

d'où : $$\log. T' = 2.602 - \frac{0.000061 \times 30}{0.50 \times 0.20 \times 6}$$

$$T' = 397^{o}$$

il n'y a encore pas de refroidissement sensible.

Admettant les vitesses 5.^{m}12 et 6.^{m}00, nous voyons que, en doublant la hauteur, nous ne gagnons que 0.^{m}88 de plus à la vitesse, c'est-à-dire 1/6, d'où résulte que :

Lorsque les cheminées ont plus de 10.^{m}00, le tirage augmente, à diamètre égal, mais dans une si faible proportion, par rapport à la dépense que cela occasionne, qu'il y a tout avantage à ne pas dépasser cette hauteur, et à augmenter le diamètre quand on veut produire un plus fort tirage.

Revenons maintenant à la question que nous nous sommes proposé de résoudre dans ce paragraphe, savoir :

Quelle est la dépense en unités de chaleur pour brûler un kilogramme de carbone?

La température moyenne de la fumée abandonnée dans les cheminées de tirage, est de 400°, et toutes les formules que nous venons de passer en revue sont établies sur cette base.

En supposant, comme précédemment, que le poids d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de carbone, est 20.^{k}00, nous dirons :

Si la capacité calorifique de l'air était la même que celle de l'eau ; la quantité de chaleur à dépenser serait :

$$20 \times 400 = 8000 \text{ unités de chaleur.}$$

Mais comme la capacité calorifique de l'air n'est que le 1/4 de celle de l'eau, la dépense sera seulement :

2000 unités de chaleur,

c'est-à-dire 1/3 de la chaleur produite par le combustible.

Or, on brûle 4.^{k}5 en moyenne de carbone par heure et par force de cheval, en supposant que 1/3 est employé pour produire le tirage, donc $\frac{1}{3} \times 4.5 \times 6000 = 9000$ unités de chaleur perdue.

Nous en concluons que si $4.5 \times 4000 = 18000$ unités de chaleur font la force de 1 cheval pendant une heure, ces 18000 unités de chaleur correspondent à $3600 \times 75 = 270000$ kilogrammètres. Les 9000 unités de chaleur dépensées pour produire le tirage correspondront donc à 135000 kilogrammètres.

Ainsi, dans le cas où on a la possibilité d'utiliser toute la chaleur produite par le combustible :

Le tirage mécanique coûte 8200 } kilogrammètres par
Le tirage physique coûte 135000 }

kilogramme de carbone brûlé.

Il est vrai que ce cas est rare, et que généralement on ne peut refroidir la fumée à moins de 100 ou 200°, suivant les appareils ; admettons 200°. Alors le tirage physique exigeant 400°, ne coûte plus que 67500 kilogrammètres, c'est-à-dire 8 fois autant que le tirage mécanique.

Il est vrai aussi que pour produire les 8200 kilogrammètres d'effet utile mécanique, il faut bien dépenser 15000 kilogrammètres. Mais 15000 n'est encore que les 2/9 de 67500.

Il y a donc un immense avantage à produire le tirage mécaniquement et par inspiration, toutes les fois que cela est possible.

ARTICLE III.

CONSTRUCTION DES FOYERS.

Les formes et dimensions des foyers sont nécessairement assujetties à la nature du combustible que l'on emploie.

Nous avons distingué six espèces de combustibles, savoir :

Le charbon de bois,
Le coke,
Le charbon de tourbe,
La houille,
Le bois,
La tourbe,

dont trois naturelles et trois artificielles, savoir :

Naturelles.	*Artificielles.*
Bois donnant.	Charbon de bois,
Houille	Coke,
Tourbe	Charbon de tourbe,

que nous allons étudier successivement afin d'en déduire les formes des foyers dans lesquels on doit les brûler.

§ 1er. — BOIS ET CHARBON DE BOIS.

1° *Bois.*

Les bois sont des produits végétaux composés de :

Ligneux, ou hydrate de carbone,
Eau,
Résine,
Cendres.

Le *ligneux* est un composé de carbone et de divers hydrogènes carbonés, donnant, par la distillation, une série de produits d'un intérêt très-grand, sous le point de vue chimique. Lorsque le bois est bien sec, il contient jusqu'à 95 p. 100 de ligneux.

L'*eau* contenue dans les bois est en quantité excessivement variable. Ainsi les bois verts en contiennent jusqu'à 50 p. 100 en poids qu'on peut leur enlever par la dessiccation. Les bois, parfaitement desséchés à 100°, contiennent 48 p. 100 d'eau combinée. Si, dans cet état, on les expose à l'air, ils absorbent 1/10 de leur poids d'eau.

La *résine* existe en très-petite quantité dans la plupart des bois de chauffage, excepté dans le pin où elle entre quelquefois jusqu'à 28 p. 100 en poids.

Les *cendres*, résidu de la combustion, sont des sels minéraux incombustibles, et principalement des carbonates de potasse, de chaux et de magnésie pour les plantes terrestres, et du carbonate de soude pour les plantes marines. Les quantités qu'en contiennent les bois varient entre 1 p. 100, comme dans le *bouleau*, et 6 p. 100, comme dans l'*écorce de chêne*.

Les bois sont coupés l'hiver, dans les forêts, et restent de huit à douze mois exposés à l'air avant d'être employés. Au bout de ce temps, ils contiennent encore 25 p. 100 d'eau libre.

Si on emploie les bois, comme combustibles, chargés de cette quantité d'eau, on n'utilise que la différence qui existe entre la chaleur qu'ils produisent et celle qui est absorbée par la vaporisation de cette eau.

On distingue deux espèces de bois employés comme combustibles, savoir :

Les bois durs, qui sont :

Le chêne,
Le hêtre,
L'orme,
Le frêne,

et les bois tendres, qui sont :

Le pin,
Le sapin,
Le bouleau,
Le tremble,
Le peuplier.

La combustion des bois durs diffère de celle des bois tendres, en ce que les premiers se distillent et ne produisent de flamme que pendant les premiers instants de la combustion, tandis que les seconds se laissent facilement attaquer intérieurement par l'air, et donnent de la flamme pendant tout le temps de la combustion. Si les bois durs sont en petits morceaux, alors ils se laissent entamer comme les tendres.

Puissance calorifique des bois.

Dans 100 parties de bois sec, il y a 52 parties de carbone. La puissance calorifique du carbone est 7300; celle du bois serait donc :

$$\frac{52 \times 7300}{100} = 3800$$

Mais sur ces 3800 unités de chaleur, il y en a 300, plus ou moins, absorbées par la vaporisation de l'eau contenue dans les fibres et la distillation des matières empyreumatiques, d'où résulte que cette puissance calorifique est évaluée, en moyenne, comme égale à 3500.

Donc, 1 kilogramme de bois sec produit, en brûlant, 3500 unités de chaleur, c'est-à-dire, peut élever 3500 kilogrammes d'eau de 1 degré.

La quantité de chaleur produite par le bois étant proportionnelle à son poids, nous allons donner les poids du stère des différents bois, afin d'en conclure la valeur d'après la capacité calorifique de 1 kilogramme.

Soit 100 la quantité de chaleur produite par un stère de noyer sec, on a :

	Poids du stère.	Nombre proportionnel.
Noyer à écorce écailleuse . .	578.00 . .	100
Chêne blanc.	510. 00 . .	86
Frêne	445. 00 . .	77
Hêtre	420. 00 . .	65
Charme.	415. 00 . .	65
Orme	338. 00 . .	58
Pin.	317. 00 . .	54
Bouleau.	306. 00 . .	52
Châtaignier.	300. 00 . .	42
Peuplier d'Italie.	228. 00 . .	40

Les nombres proportionnels ci-dessus sont non-seulement déduits du poids du stère de bois, mais encore de la quantité de carbone qui entre dans chacun des bois. D'où résulte que le volume qui se vend 100 fr., en bois de noyer, doit se vendre 88 fr. en chêne, 77 fr. en frêne, et ainsi de suite.

La chaleur transmise par le bois se divise en deux, savoir :

Chaleur transmise	par rayonnement direct.	900
	par contact. . . .	2600
	Total. . .	3500 unités de ch.

2° *Charbon de bois.*

Nous avons dit que le bois desséché à 100° contient 52 p. 100 de carbone. Si donc on distille, à l'abri du contact de

l'air, 100 parties de bois sec, on devra obtenir pour résidu dans la cornue, 57 parties environ, se composant de :

52 parties charbon,
5 parties cendres.

C'est en effet ce qui a lieu dans les laboratoires ; mais en pratique il n'en est pas ainsi.

Le bois distillé est friable, et par conséquent susceptible de donner un déchet très-considérable à la vente ; de plus, il absorbe l'humidité de l'air ; aussi n'est-ce pas par la distillation que se fabrique le charbon de bois.

Le charbon du commerce se prépare dans les forêts, de la manière suivante :

On fait des meules en forme de cônes très-surbaissés avec des bois de moyenne grosseur, coupés d'égales longueurs ; on recouvre le tout de terre, et on met le feu dans des canaux inférieurs, ménagés à cet effet et communiquant avec des cheminées verticales ; on laisse brûler tant qu'il se dégage de la fumée par les cheminées. Quand il ne se dégage plus de fumée, on bouche tous les trous et on laisse éteindre.

Par cette méthode, on obtient de 15 à 18 charbon p. 100 bois employé. Il est vrai que ce bois, qui a généralement une, deux ou trois années de coupe, contient encore, d'après ce que nous avons dit plus haut, de 20 à 25 p. 100 d'eau libre, il n'y a donc réellement que 75 à 80 kilogrammes de bois sec, lequel se compose de :

$0.52 \times 80 = 41.^{k}5$ carbone et cendres,
$0.48 \times 80 = 38.5$ eau ;

ou :

$0.52 \times 75 = 39$ kil. charbon,
$0.48 \times 75 = 36$ *id.* eau.

La vaporisation des 36 kil. d'eau exige, comme nous le verrons plus tard, $36 \times 650 = 23500$ unités de chaleur, lesquelles représentent $\frac{23500}{3500} = 6.^{k}7$ de bois. Il n'y a donc au plus que 33 kilogrammes de charbon à obtenir. Mais de 15 ou 18 à 33 il y a une différence de moitié, aussi le prix de revient du charbon est-il considérable par rapport à celui du bois, non à Paris, où les transports établissent une compensation, mais sur place.

On est arrivé, par une méthode de carbonisation perfec-

tionnée, à produire jusqu'à 25 p. 100 de charbon ; c'est le maximum que l'on ait obtenu.

De même que l'on distingue deux espèces de bois, on distingue aussi deux espèces de charbons :

Les charbons durs,
Les charbons légers.

Les premiers sont donnés par les bois durs, et les seconds par les bois tendres.

Il est bon de remarquer néanmoins que tous les bois durs ne donnent pas des charbons durs ; il faut encore qu'ils soient de qualité suffisante pour que leurs charbons jouissent des propriétés des charbons durs.

Les charbons durs brûlent lentement ;
Les charbons légers brûlent vite.

La densité du charbon en morceaux est plus petite que celle de l'eau ; mais celle du charbon en poudre est plus grande.

La puissance calorifique du charbon est 7500, c'est-à-dire que 1 kilogramme de charbon peut élever 7500 kilogrammes d'eau de 1°.

A volumes égaux les charbons ne pèsent pas tous le même poids ; d'où résulte que les quantités de chaleur données par des volumes égaux sont différentes.

Les chiffres suivants indiquent les quantités de chaleur relatives données par des volumes égaux de différents charbons :

Charbon de noyer.	100
Charbon d'érable.	69
Charbon de chêne.	64
Charbon de pin.	45

§ 2. — HOUILLE ET COKE.

1° *Houille.*

La houille est un produit naturel qui se trouve dans le sol. Sa composition étant la même que celle des bois, on suppose que les amas de cette matière qui existe en si grande abondance dans certaines localités et à de grandes profondeurs, sont d'anciennes forêts englouties par des tremblements de terre.

La densité moyenne de ce combustible est 1,3.

Il se compose généralement de :

Produit volatil.... { carbone, bitume, huiles essentielles.

Cendres. . . . . { oxide de fer.
sulfure de fer.
sulfate de chaux.
silice.

Les produits de la combustion sont alors :

Acide carbonique,
Vapeur d'eau,
Acide sulfureux,
Azote,
Cendres.

On distingue quatre espèces de houilles, dont deux principales, savoir :

Les houilles grasses,
Les houilles sèches.

Deux secondaires comme rares :

Les houilles compactes,
L'antracyte.

Les *houilles grasses* fondent par la chaleur, se boursoufflent, s'agglomèrent, et brûlent avec flamme et fumée.

Les *houilles sèches* ne fondent ni ne se boursoufflent ; elles ne donnent pas non plus de flamme ou à peine. Elles ressemblent beaucoup au coke sous ces rapports.

Les premières s'emploient pour chauffage des chaudières et des fours.

Les secondes s'emploient pour la cuisson des briques et autres opérations analogues.

Les *houilles compactes* ou *candlecooll* se trouvent dans une certaine localité de l'Angleterre. Ces houilles brûlent avec une belle flamme blanche sans fumée, et se vendent comme combustible de luxe. Elles produisent aussi un gaz excellent, d'où résulte qu'elles se vendent fort cher.

L'*antracyte* s'exploite particulièrement en Amérique, qui en possède une mine inépuisable : ce combustible pénètre tous les jours de plus en plus dans les usages industriels.

Il est très-dur et très-compacte, d'où résulte qu'il est difficile à brûler et nécessite des foyers particuliers. A volume égal il a une capacité calorifique beaucoup plus grande que la houille proprement dite.

Les houilles contiennent en général :

81	carbone,
2	hydrogène,
10	eau,
7	cendres.
100	

Si on déduit de cette composition la capacité calorifique des houilles, on trouve au plus 6000, nombre que des expériences faites il y a déjà quelques années ont confirmé. Depuis on a trouvé beaucoup plus ; mais, bien qu'il n'y ait encore pas eu de travail complet sur cet objet, nous adopterons le nombre 7000.

Un kilogramme de houille peut élever 7000 kilogrammes d'eau de 1°.

L'hectolitre de houille pèse en moyenne 80 kilogrammes.

2° *Coke.*

Le coke est le résultat de la carbonisation de la houille.

Les cokes provenant de houilles grasses sont des masses boursoufflées et poreuses.

Les houilles maigres ne contiennent pas de matières volatiles, ne changent pas de nature par la carbonisation ; aussi n'emploie-t-on que les houilles grasses pour faire du coke.

Bien que la houille contienne 80 p. 100 de carbone, il y a toujours 50 p. 100 de déchet dans la carbonisation de la houille. Ainsi on compte généralement que 100 kilogrammes de houille donnent 50 kilogrammes de coke.

Lorsque les houilles sont grasses, les cokes qui en proviennent augmentent de volume dans la proportion de 1 à 1.4. Ainsi 100 kilogrammes de houille occupant un volume 1 donnent 50 kilogrammes de coke occupant un volume 1.4, d'où suit que un volume de coke pèse :

$$1.4 : 50 :: 1 : x = 36^{k}00.$$

Un hectolitre de houille pesant 80 kilogrammes, un hectolitre de coke ne pese que :

$$100 : 36 :: 80 : x = 29 \text{ kil.}$$

Ce poids est un minimum correspondant aux houilles très-grasses. Très-souvent l'hectolitre de coke pèse 35 et même 40 kilogrammes.

§ 3. — TOURBE ET CHARBON DE TOURBE.

1° *Tourbe.*

Les tourbes sont des amas de plantes plus ou moins altérées qui se déposent dans les terrains humides et marécageux. Elles contiennent du sable et de la terre en quantités très-variables; on y trouve aussi des détritus d'animaux.

Le produit de la combustion de la tourbe se compose de :

Eau,
Acide carbonique,
Ammoniac,
Acide sulfureux,
Cendres.

La puissance calorifique de la tourbe varie entre 1/5 et 1/2 de celle de la houille.

Les foyers à houille sont tout-à-fait impropres à brûler la tourbe. Les foyers à tourbe doivent être étroits et longs.

Elle s'extrait principalement dans les marais, là où on peut l'enlever au *louchet* et où elle n'est pas recouverte d'eau.

Il existe beaucoup de localités où la tourbe existe au fond de lacs, mares ou étangs. La Société d'encouragement ayant proposé un prix en 1813 pour la construction d'un appareil propre à extraire la tourbe sous l'eau, M. *A. Jullien* père présenta l'outil représenté *Pl.* XVIII, *fig.* 1 et 2, appelé *louchet à tranchant mobile*, et obtint le prix proposé. Cet outil a l'avantage d'extraire la tourbe en lopins réguliers qu'il suffit d'enlever et d'exposer à la dessiccation, comme cela se pratique pour l'extraction à sec; seulement, dans ce dernier cas, il est nécessaire de lui faire subir une manipulation pour la réduire en briquettes.

2° *Charbon de tourbe.*

La carbonisation de la tourbe donne un produit analogue aux houilles maigres, d'un assez bon usage, mais impropre à la combustion dans les foyers découverts, comme ceux de cuisine, parce qu'il dégage, en brûlant, de l'ammoniac et de l'acide sulfureux.

S'il ne boursouffle pas comme le coke, il n'en est pas moins poreux, ce qui rend sa combustion très-intense quoique très-lente, à cause de la quantité énorme de cendres qu'il contient.

La capacité calorifique du charbon de tourbe est variable en raison de la quantité de cendres qu'il contient; mais la faculté rayonnante est égale à celle du charbon de bois.

Nous terminerons l'étude des combustibles par les tableaux suivants :

1° *Tableau des quantités d'air nécessaires à la combustion des différents combustibles.*

COMBUSTIBLES.	PUISSANCES calorifiques. — UNITÉS de chaleur.	QUANTITÉS D'AIR indispensables à leur combustion en poids.	en volumes.
		kil.	m. c.
Carbone pur. . . .	7500	11.46	8.820
Charbon de bois. .	7400	11.46	8.820
Coke.	7300	10.20	7.860
Charbon de tourbe.	7200	10.00	7.720
Houille.	7000	9.45	7.250
Bois.	3500	5 50	4.240
Tourbe (bonne qualité).	3000	4.72	3.620

Les quantités d'air qu'il est nécessaire d'injecter dans les foyers sont doubles de celles qui sont indispensables à la combustion.

2° *Tableau des valeurs relatives des différents combustibles en mesures usuelles, déduites de leurs capacités calorifiques.*

1 hectolitre de houille.		1.00
1 stère bois de noyer d'une année		4.23
1 *id.*	chêne blanc.	3.73
1 *id.*	frêne.	3.26
1 *id.*	hêtre.	3.06
1 *id.*	orme.	2.45
1 *id.*	bouleau.	2.25
1 *id.*	châtaignier.	2.20
1 *id.*	charme.	3.04
1 *id.*	pin.	2.33
1 *id.*	peuplier d'Italie.	1.67

1 hectolitre charbon de noyer.			0.61
1	*idem*	chêne.	0.53
1	*idem*	frêne.	0.46
1 hectolitre charbon de hêtre.			0.37
1	*idem*	orme.	0.35
1	*idem*	bouleau.	0.32
1	*idem*	châtaignier.	0.31
1	*idem*	charme.	0.37
1	*idem*	pin.	0.33
1	*idem*	peuplier d'Italie.	0.23
1 *idem* coke.			0.38
1 stère tourbe de Beauvais, 2ᵉ qualité			3.28

3° *Tableau des quantités de chaleur transmise par le rayonnement.*

COMBUSTIBLES.	COEFFICIENTS.	CHALEUR TRANSMISE en unités de chaleur		TOTAL.
		par rayonnement	par contact.	
Bois.	0.25	900	2600	3500
Charbon.	0.33	2460	4940	7400
Houille.	0.33	2300	4700	7000
Coke.	0.33	2433	4867	7300
Tourbe.	0 33	1000	2000	3000
Charbon de tourbe.	0.32	2300	4900	7200

§ 4. — CONSTRUCTION PROPREMENT DITE DES FOYERS.

Les foyers, en général, consistent en un espace renfermé entre quatre murs verticaux et divisé en deux étages ; l'un inférieur appelé *cendrier*, l'autre supérieur appelé *foyer*. Ces deux étages sont séparés l'un de l'autre par un diaphragme en fonte, à claire voie, appelé *grille*. Le foyer et le cendrier possèdent chacun une porte sur la face principale du *fourneau*, nom que l'on donne à l'ensemble des appareils où s'effectuent la combustion et le chauffage. La porte du cendrier sert : 1° à enlever les cendres qui sont abandonnées par le combustible,

au fur et à mesure qu'il brûle, et traversant la grille viennent tomber à la partie inférieure du cendrier; 2° à l'introduction de l'air qui sert à alimenter la combustion.

La porte du foyer sert à l'introduction du combustible sur la grille.

Le but de la grille est:

1° De donner à l'air un accès facile partout où il y a combustion;

2° De maintenir à une température moyenne, l'emplacement qui supporte le combustible.

Ces deux conditions sont parfaitement remplies en ce que, d'une part, le combustible étant étalé sur toute la surface de la grille qui est à claire voie, l'air n'a absolument à vaincre que la résistance qui lui est opposée par l'épaisseur du combustible, mais, du reste, traverse ce dernier de part en part en tous ses points.

D'un autre côté, le courant d'air froid qui se renouvelle sans cesse sous la grille empêche cette dernière de s'échauffer à un degré trop élevé, ce qui fait qu'on peut construire les grilles en fonte sans inconvénient.

La hauteur du cendrier n'est pas indifférente. Lorsque ce dernier est très-bas, le rayonnement du combustible sur le sol inférieur se reflète sur la partie inférieure de la grille et tend alors à la faire fondre. La hauteur de chargement la plus convenable, pour l'homme, étant o.^{m}80, il est bon de ne jamais donner moins de o.^{m}80 à la surface de la grille au-dessus du sol du cendrier. Dans plusieurs usines, depuis quelque temps, on a contracté l'habitude de creuser légèrement le fond du cendrier, et d'y faire séjourner de l'eau qui absorbe alors la totalité des rayons émis par le combustible suivant cette direction. Ce qui est le mieux à notre avis, c'est de creuser beaucoup le cendrier, sauf à avoir une trappe au-dessous du chauffeur pour aller enlever les cendres.

Dimensions des grilles.

On a trouvé par expérience que la meilleure surface de grille pour la houille était, en moyenne, o.^{m}·q·15 par chaque 10 kilogr. de combustible brûlés par heure; ce chiffre devant être légèrement diminué pour des houilles de qualité supérieure, et légèrement augmenté pour des houilles de qualité médiocre. Nous avons eu occasion de vérifier souvent l'exactitude de ce chiffre, et partout cette donnée a toujours concordé avec la combustion la plus satisfaisante.

La longueur de la grille doit être, autant que possible, égale à 1.2 fois sa largeur. Nous disons autant que possible, parce qu'il ne la faut pas trop longue, si on veut que le chauffeur puisse jeter commodément le combustible jusqu'au bout. D'un autre côté, il ne la faut pas trop large, car il est bien difficile de garnir parfaitement la grille sur les côtés, surtout quand la porte est petite, ce que l'on recherche autant que possible pour éviter la déperdition de chaleur qui a toujours lieu pendant le chargement.

Pour le coke, la surface des grilles est toute différente, si on s'en rapporte à ce qui a lieu aujourd'hui dans les locomotives. Dans les foyers de ces machines, on brûle 5 kilogrammes de coke par heure et par décimètre quarré de surface de grille.

Dans ce cas, l'épaisseur du combustible sur la grille est de $0.^{m}50$ à $0.^{m}60$, tandis que pour la houille, cette épaisseur varie entre $0.^{m}08$ et $0.^{m}20$, suivant la grosseur des morceaux de la houille employée.

Les grilles sont formées de *barreaux* placés les uns à côté des autres, dont les formes varient suivant le combustible que l'on brûle.

Pour la houille menue, c'est-à-dire en poussière, les barreaux ont la forme AB (*fig.* 8). Ils se placent longitudinalement, c'est-à-dire perpendiculairement à la face principale du fourneau. Leur épaisseur est de 3 centimètres, et ils laissent entre eux un vide de 1 centimètre. Si la houille est *gailleteuse*, c'est-à-dire en morceaux gros comme un œuf au moins, l'espacement des barreaux peut être plus considérable. En général, cet espacement doit être tel que le combustible ne tombe jamais dans le cendrier qu'à l'état de scorie, c'est-à-dire de cendres vitrifiées par la température du foyer. Pour le coke, qui est toujours en morceaux, et qui exige une grande affluence d'air en raison de son épaisseur sur la grille, les grilles ont la forme CD (*fig.* 9).

Les barreaux sont généralement en fer, de 1 centimètre d'épaisseur, laissant entre eux un espace de 9 centimètres; ce qui fait 10 centimètres de milieu en milieu.

Les grilles à charbon de bois doivent être analogues à celles de coke, à l'espacement près, qui doit être au plus de 2 centimètres. Celles à tourbe se rapprochent de celles à houille, avec un espacement d'au moins 2 centimètres, et une épaisseur d'au plus 2 centimètres; dans ces dernières, on peut compter,

malgré les cendres qui en rendent la combustion lente, 10 kilogrammes brûlés par heure et par chaque o.$^{m.q.}$10 de surface de grille.

Le charbon de tourbe se rapproche du coke, mais il exige, comme le charbon de bois, un rapprochement des barreaux moindre, il est vrai, mais d'environ moitié, suivant sa grosseur.

Nous n'avons pas parlé du bois; c'est qu'en effet le bois est un combustible qui brûle trop bien par la méthode dite à *flamme renversée*, pour qu'il soit jamais convenable de le brûler, dans les arts, sur des grilles.

On appelle foyers à flamme renversée, les foyers dans lesquels l'air traverse le combustible de haut en bas, au lieu de bas en haut, comme cela a lieu dans les foyers à grille.

Par ce moyen, la charge, qui a toujours lieu par superposition, se fait par le même conduit que l'introduction de l'air. Il n'y a par conséquent pas de porte à ouvrir pour le chargement, d'où résulte que la combustion est uniforme et la température du foyer constante. Mais pour opérer la combustion à flamme renversée, il n'est pas possible de faire usage de grille, car la flamme, en traversant cette dernière, l'aurait bientôt brûlée complètement. Or, il n'est pas possible, du moins quant à présent, de brûler de la houille, du coke, etc., sans grille; il n'est donc pas, par conséquent, possible de brûler ces combustibles à flamme renversée.

Le bois seul peut brûler sans grille, quand on le dispose convenablement pour cela ; de là l'origine des foyers à bois à flamme renversée.

Ces foyers consistent en un espace (*fig.* 10) entouré de quatre murs comme les autres, ouvert dans le haut et à la partie inférieure A de la face en contact avec l'appareil à chauffer. Le tirage a lieu par l'ouverture inférieure A, dont la largeur est un peu moindre que la longueur des bûches qui se placent dans le foyer B, horizontalement et parallèlement à la face principale C. En bas sont, de chaque côté, sur les faces latérales, deux petites portes D, fermées avec des plaques en terre cuite, que l'on ouvre de temps en temps pour retirer les cendres et la *braise* que laisse le bois, laquelle tend à obstruer l'orifice A.

Les foyers de ce genre, quelle que soit la quantité de bois à brûler par heure, doivent toujours avoir au moins o.^{m}40 de

a en *b*. Quant à la largeur, on la fait égale à la longueur des bûches ou à moitié, suivant la quantité à brûler. L'orifice A varie entre o.^{m}20 et o.^{m}30 de haut. On peut, avec un grand foyer, avoir une combustion aussi lente que l'on veut, en ayant soin de ne retirer les braises qu'autant qu'elles obstruent une partie de l'orifice A, plus grande que celle que l'on veut donner.

Les parois des foyers se construisent avec des briques, tantôt tendres, tantôt réfractaires, suivant l'activité que doit avoir la combustion.

Lorsque les foyers sont destinés à chauffer de l'eau ou de l'air, on les construit quelquefois en fonte de fer ou en fer, en ayant soin de les entourer d'eau, ou d'établir un violent courant d'air autour, afin d'empêcher la température de s'élever assez pour exposer les parois à être brûlées ou fondues.

CHAPITRE II.

CHAUFFAGE.

De même qu'il y a, dans la nature, trois états des corps, de même aussi il y a trois espèces de chauffages, savoir :

Le chauffage des solides ;
Le chauffage des liquides ;
Le chauffage des gaz.

Le but général du chauffage étant d'élever la température, il peut se présenter deux cas ; savoir :

Ou le corps chauffé éprouve un changement ou une modification dans tout ou partie de ses propriétés, sans changer d'état ;

Ou le corps chauffé change d'état, et passe soit de l'état solide à l'état liquide, soit de l'état liquide à l'état gazeux ; mais pas au-delà.

Nous allons envisager ces différents cas dans l'étude du chauffage de chaque espèce de corps.

SECTION Ire.

CHAUFFAGE DES SOLIDES.

Lorsque le chauffage n'a pour but que de changer ou modifier tout ou partie des propriétés du corps chauffé, sans le

faire changer d'état, le chauffage des solides porte, dans ce cas, le nom de *cuisson*.

Lorsque le chauffage a pour but de faire passer le corps de l'état solide à l'état liquide, il porte, dans ce cas, le nom de *liquéfaction*.

Dans les deux cas, les appareils où s'opère le chauffage, portent le nom de *fours*.

On distingue trois grandes classes de solides, que l'on soumet dans les arts à l'action du feu, ce sont :

1° Les pierres ;

2° Les argiles ;

3° Les métaux et leurs oxides.

Le chauffage des pierres seules et des argiles seules va rarement plus loin que la cuisson.

Les pierres que l'on cuit sont en général :

1° Le sulfate bi-hydraté de chaux, pour faire du plâtre;

2° Le carbonate de chaux, pour faire de la chaux.

La cuisson des argiles constitue la dernière opération de la fabrication des poteries.

Les poteries se divisent en :

Terres cuites, telles que briques, carreaux et tuiles,
Grès,
Faïences,
Porcelaines.

Le chauffage des métaux ou de leurs oxides seuls ou combinés, a toujours pour but d'opérer un changement par la liquéfaction, soit dans les formes, soit dans les propriétés des solides.

C'est ainsi que par la fusion des minerais de fer, dans du carbone, on produit la fonte, et par la fusion de la fonte, le fer.

De même, par la fusion des minerais de plomb, on sépare l'argent du plomb en faisant passer ce dernier à l'état de litharge.

Enfin, si l'on fond ensemble de la silice et divers oxides métalliques, tels que la potasse, la soude, la chaux, l'oxide de plomb, etc., on produit des verres.

Et ainsi de suite.

Suivant les opérations à effectuer, les fours varient de formes et dimensions.

Or, pour bien comprendre les motifs qui font adopter telle ou telle forme de four pour la cuisson de telle ou telle ma-

tière, il faut connaître les propriétés de cette dernière. Nous croyons donc devoir renvoyer à la chimie industrielle qui traite spécialement de la fabrication, c'est-à-dire de la conversion des diverses matières envisagées ci-dessus, en produits commerciaux.

SECTION II.

CHAUFFAGE DES LIQUIDES.

Parmi tous les liquides que l'on peut exposer à l'action du calorique, soit pour élever leur température, soit pour les convertir en vapeurs, il en est un, l'*eau*, dont l'importance est tellement considérable, dans les arts, qu'il absorbe à lui seul toutes les considérations que l'on pourrait faire sur les autres.

Le chauffage de l'eau, en tant qu'il ne s'agit que d'élever sa température au-dessous de 100°, sous la pression 0.m76 de mercure, ne présente rien de bien intéressant. Mais dès qu'il s'agit de dépasser cette température, alors c'est non-seulement du chauffage qu'il faut opérer, mais de la *vaporisation*.

EAU.

L'eau est un composé d'oxigène et d'hydrogène dans les proportions de :

Oxigène. .	1 atome =	100.00	ou	88.80
Hydrogène	2 atomes =	12.48	p. %	11.20
	1 atome d'eau =	112.48		100.00

L'eau est solide au-dessous de 0° du thermomètre centigrade, et liquide jusqu'à des températures assez élevées, suivant la pression et la température auxquelles elle est soumise.

Un kilogramme d'eau absorbe, en passant de l'état solide à l'état liquide, 75 unités de chaleur latente, et en passant de l'état liquide à l'état gazeux, 650 unités de chaleur latente, moins le nombre de ces dernières représentées par la température à laquelle a lieu l'ébullition.

Ainsi, un kilogramme de vapeur produite absorbe :

A	0°	650	unités de chaleur latente.
	50°	600	*idem.*

A 100°	. . . . .	550	unités de chaleur latente.
600°	. . . . .	50	*idem.*
650°	. . . . .	0	*idem.*

D'où résulte que, à 650 degrés, toute l'eau renfermée dans un vase est à l'état de vapeur, car il n'y a pas de chaleur à dépenser pour la convertir en cette dernière.

On ne connaît pas la loi suivant laquelle croissent les degrés d'ébullition, au thermomètre, proportionnellement aux pressions. Faute de cela, on a été obligé de déterminer ces rapports par expérience. Cet important travail est dû à notre célèbre physicien, M. Dulong, et a donné les résultats suivants :

(*Voir le Tableau suivant, page* 214.)

Les deux dernières colonnes de ce tableau ont été calculées au moyen des premières, sachant que, à 100°, sous la pression 0.m76, un kilogramme d'eau donne 1,700 litres de vapeur. La dilatation des vapeurs étant la même que celle des gaz en général, on obtient le volume à une pression et température quelconques correspondantes, en posant :

$$V' = V \frac{h}{h'} \times \frac{1 + 0{,}00366\, t'}{1 + 0{,}00366\, t}$$

et faisant dans cette équation :

$$V = 1700$$
$$h = 0.^{m}76$$
$$t = 100^{\circ}$$

ce qui donne :

$$V = 1700 \frac{0.76}{h} \times \frac{1 + 0.00366\, t}{1{,}366}$$

Connaissant les volumes de vapeur correspondants à un même poids d'eau, on a les poids de 1 mètre cube de vapeur, en divisant le poids du mètre cube d'eau par le volume correspondant à ce poids pour les température et pression considérées.

On convertit l'eau en vapeur en la renfermant dans une chaudière exposée à la flamme d'un foyer ; les parois de cette dernière étant conductrices de la chaleur, laissent passer celle

Tableau des températures, volumes et densités de la vapeur à différentes pressions.

PRESSIONS DE LA VAPEUR A SA NAISSANCE,			Températures en degrés centigra-des corresp aux div. pressions.	Volume en litres d'un kilog. de vapeur à la pression indiq. et à sa temp. réelle.	Poids du mètre cube de vapeur.
En atmosphères.	En mètres de mercure.	En kilogr. par mètre quarré.			
10.00	7.60	103360	182.00	207.98	4.808
9 00	6.84	93020	177.40	228.72	4.373
8.00	6.08	82680	172.15	254.27	3.934
7.00	5.32	72350	166.42	286.70	3.488
6.75	5.13	69770	164.84	296.35	3.374
6.50	4.94	67190	163.25	306 62	3.261
6.25	4.75	64610	161.54	317.58	3.149
6 00	4.56	62010	160.00	329.65	3.033
5.75	4.37	59430	158.30	342.76	2.917
5.50	4.18	56850	156.70	356 86	2.802
5.25	3.99	53270	155.00	372.32	2.690
5.00	3.80	51680	153.30	389.38	2.568
4.75	3.61	49100	151.15	406.76	2.457
4.50	3.42	46520	149.15	428.36	2.334
4.25	3.23	43940	146.76	450.96	2.217
4.00	3.04	41340	144.95	477.05	2.096
3.75	2.85	38760	142.70	506.15	1.972
3.50	2 66	36180	140.35	539.10	1.855
3.25	2.47	33600	137.70	576.83	1.734
3.00	2.28	31000	135 00	620.74	1.611
2 75	2.09	28420	132.15	672.36	1.487
2.50	1.90	25840	128.85	733.45	1.363
2.25	1.71	23260	125.50	808.00	1.238
2.00	1.52	20670	121.55	899.91	1 111
1.75	1.33	18090	117.10	1016.66	0.984
1.50	1.14	15510	112.40	1171.59	0.854
1.25	0 95	12930	106.60	1384.36	0.722
1.00	0.76	10336	100 00	1700.00	0 588
0 75	0.57	7760	92.00	2217.20	0.451
0.50	0.38	5180	82.00	3229.36	0.310
0.25	0.19	2600	66.00	6198.38	0.161

développée par le combustible, soit par rayonnement, soit par contact.

En admettant que toute la chaleur développée par le combustible est absorbée par l'eau de la chaudière, 1 kilogramme de carbone donnant 7500 unités de chaleur, par sa combustion, vaporise, au maximum, $\frac{7500}{650} = 11.^{k}55$ d'eau à 0°.

d'où, pour :		Quantité d'eau vaporisable par 1 kil. de combustible.
Charbon de bois. .	$\frac{7400}{650}$	= 11.k400
Coke	$\frac{7300}{650}$	= 11. 250
Charbon de tourbe.	$\frac{7200}{650}$	= 11. 100
Houille.. . . .	$\frac{7000}{650}$	= 10. 800
Bois..	$\frac{3500}{650}$	= 5. 400
Tourbe.	$\frac{3000}{650}$	= 4. 620

Or, dans la vaporisation, il peut se présenter trois cas :

1° Ou la fumée, sortant des canaux de circulation pour entrer dans la cheminée, est à une température plus basse que celle d'ébullition ;

2° Ou elle est à un température égale ;

3° Ou enfin elle est à une température supérieure.

Le premier cas ne peut avoir lieu qu'autant que l'alimentation de la chaudière se fait par l'extrémité de sortie de la fumée.

Le second cas a lieu toutes les fois que, l'alimentation étant en un point quelconque, la surface de chauffe est assez grande pour qu'il y ait entier refroidissement de la fumée jusqu'à cette température.

Le troisième, qui se présente le plus généralement, provient

non-seulement de ce qu'il faut une température assez élevée dans la cheminée pour produire le tirage, mais encore parce que la fumée n'a pu se refroidir assez dans sa circulation autour du liquide.

ARTICLE Ier.

VAPORISATION.

§ Ier. — CHAUDIÈRES A VAPEUR.

Une chaudière à vapeur est un vase fermé, ne donnant issue à l'eau et à la vapeur qu'il renferme que par des orifices déterminés. Les parois de ce vase doivent être d'une tenacité suffisante pour résister aux pressions qui se manifestent dans son intérieur, et aussi conductrices que possible de la chaleur dans les parties en contact avec le feu.

Pour ces divers motifs, les métaux seuls conviennent pour la construction des chaudières à vapeur, et parmi ces derniers il n'en est que trois qui puissent être spécialement employés, ce sont : le fer, la fonte et le cuivre rouge.

Pendant longtemps on a employé la fonte à cause de son prix de revient peu élevé.

Mais l'inconvénient qu'elle présente de se rompre par variation de température trop brusque, résultant d'une alimentation intermittente, ou d'une élévation de température trop prompte, y a fait renoncer. Nous citerons cependant les chaudières en fonte de la fonderie de Mme Ve Laurent Thiébaut, qui y fonctionnent tous les jours depuis plus de 15 ans et n'ont jamais éprouvé cet inconvénient; ce qui nous porte à croire que si les chaudières en fonte ont présenté l'inconvénient de se rompre, c'est qu'elles étaient en fontes hétérogènes ou mal assemblées, ou refroidies trop subitement après la coulée, etc., ce qui fait qu'il ne serait pas impossible que l'on revînt par la suite à ce genre de générateur, qui possède le grand avantage de ne nécessiter aucun entretien et ne s'use pas.

Le cuivre rouge est le métal qui convient le mieux pour chaudières, parce que c'est celui qui, à surface égale, laisse passer le plus de chaleur dans le même temps. Mais il coûte trop cher, et bien que l'on construise encore tous les jours des chaudières en ce métal, il entre pour fort peu dans la quantité fabriquée, comparativement au fer.

La tôle de fer est le métal exclusivement employé aujourd'hui pour la construction des chaudières à vapeur, excepté pour locomotives, où toute la partie en contact avec le feu est en cuivre.

Pour nous faire une idée des prix de revient relatifs de trois chaudières, l'une en fonte, la seconde en tôle de cuivre rouge, la troisième en tôle de fer,

Les facultés conductrices de la chaleur de ces trois métaux sont entre elles comme :

Cuivre.	1.000
Fer.	0.416
Fonte..	0.625

A quantités de chaleur égales transmises dans le même temps, les surfaces doivent être entre elles en raison inverse de leurs facultés conductrices; ainsi, pour :

Cuivre. 1.m.q.00

on a : Fer. . . $\frac{1.000}{0.416} = 2.40$

Fonte. . $\frac{1.000}{0.625} = 1.60$

Les épaisseurs, à résistance égale, doivent être entre elles comme :

Cuivre.	1.000
Fer.	0.666
Fonte..	4.000

Les volumes de métal sont donc, dans les trois cas :

Cuivre.	1.000
Fer.	1.600
Fonte..	6.400
La densité du cuivre est.	8.870
Celle du fer	7.800
Celle de la fonte.	7.200

Les poids relatifs sont donc :

Cuivre.. . . .	8.700. . . .	1.00
Fer	12.250. . . .	1.41
Fonte.	46.200. . . .	5.30

Le prix du cuivre chaudronné est. .	3 f.	50 le kil.
Celui du fer.	1	10
Celui de la fonte.	0	55

Les prix de revient relatifs des trois surfaces transmettant la même quantité de chaleur dans le même temps, sont donc :

Cuivre.	3.50. . . .	1.000
Fer.	1.55. . . .	0.443
Fonte.	2.99. . . .	0.855

Comme on le voit, c'est la tôle de fer qui coûte le meilleur marché, mais aussi c'est elle qui duré le moins longtemps.

Dimensions des chaudières.

Quand l'alimentation est continue, les dimensions des chaudières sont assujetties uniquement à la surface de chauffe nécessaire pour transmettre une quantité de chaleur donnée dans un temps donné. Or, on distingue deux modes de transmissions de calorique, savoir :

Transmission par rayonnement,
Transmission par contact.

De là deux surfaces de chauffe :

Surface de chauffe directe,
Surface de chauffe par contact.

On ignore quel est exactement le rapport entre les quantités de chaleur transmise par ces deux genres de surfaces, à dimensions égales ; mais on sait que la quantité de chaleur transmise par rayonnement est beaucoup plus considérable que celle transmise par contact.

D'après la loi de Newton, les quantités de chaleur qui passent, dans un même temps, au travers de surfaces égales, sont proportionnelles aux différences de températures des milieux environnants.

En admettant cette loi comme exacte, il faudrait, pour l'appliquer à la détermination du rapport qui existe entre les quantités de chaleur transmise par contact et par rayonnement, connaître et la température dans le foyer, et la température dans les canaux de circulation de la fumée, lesquelles sont à peu près inconnues, et varient suivant l'activité de la combustion.

Il résulte des expériences de M. *Stephenson*, d'une part, et de celles de M. *Péclet*, d'autre part, que :

1° Dans une locomotive, la quantité de chaleur transmise par rayonnement est à peu près égale à trois fois celle transmise par contact, à surfaces égales.

2° Une surface de cuivre rouge, d'une épaisseur de deux à trois millimètres, en contact, d'un côté avec de l'eau à 100°, de

l'autre avec de l'air à 25°, laisse passer par heure environ 1100 unités de chaleur.

Nous ajouterons :

Dans les foyers de chaudières à vapeur dans lesquels le tirage est effectué par une cheminée dont la température inférieure varie entre 300 et 400°, il se consomme 5 kilogrammes de houille, en moyenne, par mètre quarré de surface de chauffe totale, et il se produit environ 30 kilogrammes de vapeur.

Nous concluons de ces données que :

1° Il faut exposer à la chaleur rayonnante du foyer le plus de surface possible de chaudière, pour, à surface égale, transmettre la plus grande quantité possible de chaleur à travers les parois.

Car, si nous représentons par k la quantité de chaleur réellement transmise par rayonnement, celle transmise par contact étant 1 pour un mètre quarré; n le nombre de mètres quarrés de surface totale; n' le nombre de mètres quarrés de surface rayonnante, la chaleur transmise dans un temps donné est :

$$1(n - n') + n'k = n'(k - 1) + n$$

k étant constant, plus n' est grand, plus cette expression est grande.

2° En appliquant au résultat, obtenu par M. *Péclet*, la loi de Newton, on a :

t, température moyenne de l'air chaud;
t', température de l'eau dans la chaudière :

$$100 - 25 : t - t' :: 1100 : x$$

d'où : $$x = \frac{1100}{75}(t - t') = 14.66\,(t - t')$$

pour nombre d'unités de chaleur passant par heure et par mètre quarré de surface de chauffe.

3° Sachant que la quantité de chaleur transmise par heure et par mètre quarré de surface de chauffe, dans les chaudières ordinaires, est de $6 \times 640 = 3840$ unités, on a, en appliquant ce résultat à la formule ci-dessus :

$$3840 = 14.66\,(t - t')$$

d'où : $$t - t' = \frac{3840}{14.66} = 260 \text{ degrés.}$$

La température, dans les chaudières, étant 145° à 4 atmosphères, il vient :

$$t = 260 + 145 = 405 \text{ degrés.}$$

Il résulte de là que la température, au bas de la cheminée, doit être au plus de 300°, car celle dans le foyer est d'environ 1200°.

Cette dernière température n'est pas facile à évaluer, en ce sens que l'on ignore quelle est la quantité exacte de chaleur transmise par rayonnement. On peut l'avoir approximativement en cherchant quelle serait la température de l'air, s'il emportait avec lui toute la chaleur transmise par le combustible.

A 20 kil., au minimum, d'air par kil. de carbone brûlé, on a, la capacité calorifique de l'air étant le 1/4 de celle de l'eau :

$$7300 = 20 \times t \times {}^1/_4$$

et :

$$t = \frac{7300}{5} = 1460 \text{ degrés.}$$

A 24 kil. pour 1 kil. de houille donnant 7000 unités de chaleur :

$$7000 = \frac{24}{4} \times t$$

$$t = 1162 \text{ degrés.}$$

4° Il n'est pas possible de définir exactement la quantité de surface de chauffe que l'on doit donner pour transmettre, par heure, à une chaudière une quantité de chaleur donnée.

Quelle que soit la surface de chauffe employée, on remplit le but que l'on se propose en brûlant des quantités variables de combustible.

Plus la surface de chauffe est grande, à tirage égal, plus on utilise la chaleur produite par une même quantité de carbone.

Il est possible que la dépense de 5 kilogrammes de carbone par mètre quarré de surface de chauffe et par heure, soit la disposition la plus économique, quand le tirage s'effectue au moyen d'une cheminée ; mais nous nous garderions bien de l'affirmer ; nous répéterons seulement que c'est le rapport généralement adopté entre la consommation et la surface de chauffe.

Formes et épaisseurs des chaudières. Il existe une infinité de formes de chaudières à vapeur, quand la pression qui a lieu à

l'intérieur ne dépasse pas celle de l'atmosphère ; mais si la pression intérieure dépasse cette dernière, alors le nombre des formes se réduit à deux seulement : le *cylindre* à base circulaire, et la *sphère*.

Les propriétés du cylindre et de la sphère que l'on met à profit dans cette circonstance, ne sont autres que celles du cercle que nous allons examiner :

Soit un cercle (*fig.* 11) dont le centre est *o* et le rayon *r*.

Supposons tous les points de sa circonférence soumis à une pression intérieure égale pour tous, la circonférence ne se déformera pas, elle ne pourra que se briser si sa résistance n'est pas suffisante. Pour calculer cette résistance, il faut connaître la valeur exacte de la pression en un point quelconque.

Soit AB un diamètre, et supposant tous les autres points d'une résistance indéfinie, cherchons la force de traction qui s'opère en chacun des points A et B, pour séparer le cercle en deux parties.

Chaque élément *m m'* de la circonférence est soumis à une force normale P dont l'action, par rapport aux points A et B, se décompose en deux, l'une parallèle, l'autre perpendiculaire à AB. La force parallèle à AB est sans influence; mais la force perpendiculaire obtient tout son effet et se décompose en deux parallèles placées en A et B, et agissant par conséquent sur ces points. Soit *p* cette composante de P perpendiculaire à AB, formant le parallélogramme des forces, nous avons :

$$P : p :: mm' : m'i$$

Si donc *mm'* représente en ligne la valeur de P, *m' i*, et mieux encore son égale *n n'*, représentera celle de *p*.

Il en sera de même pour tous les éléments de la demi-circonférence, et la pression perpendiculaire à AB agissant de chaque côté de cette ligne et tendant à séparer la circonférence en deux parties égales, est à la pression totale exercée, comme le diamètre est à la demi-circonférence, ou : . . . 1.571.

Soit P la pression sur l'unité de longueur, la pression sur la demi-circonférence est $P \times 1.571 \times 2r$, et celle pour les deux points A et B, $P \times 2r$, d'où, pour chacun d'eux, Pr.

Si F est la force de rupture au point A, on a :

$$F = Pr.$$

c'est-à-dire :

La force qui tend à séparer le cercle en deux parties, est proportionnelle à la pression intérieure et au rayon du cercle.

Passant du cercle au cylindre en tôle, considérons une lon-

gueur suivant l'axe égale à 1 centimètre seulement, et appelons e l'épaisseur du métal, R sa résistance à la traction par centimètre quarré de section, P la pression de la vapeur sur un centimètre quarré de surface, nous avons :

Force de rupture au point A = Pr.
Résistance du point A. . . . = $Re \times 1$.

Ces deux forces doivent être égales entre elles, on a donc :

$$Pr = Re$$

d'où :

$$e = \frac{Pr}{R}$$

La résistance de la tôle, dans le sens du laminage, est, au moment de la rupture :

Pour	le fer.	4000k	par centimètre quarré;
	le cuivre.	2000	*idem;*
	la fonte.	1350	*idem.*

Pour obtenir e, il faut exprimer r en centimètres, et P en kilogrammes, puis substituer celle de ces trois valeurs de R qui correspond au métal employé.

Soit, par exemple, une chaudière de 1 mètre de diamètre, devant fonctionner à 6 atmosphères.

La pression sur les parois est $6 - 1 = 5$ atmosphères, ou $5 \times 1.^{k}033 = 5.^{k}165$ par centimètre quarré.

Les valeurs de R, données plus haut, étant celles correspondantes au moment de la rupture, on est dans l'usage de ne faire supporter aux chaudières que le dixième de la charge qui produit la rupture, cela, afin qu'elles puissent servir plus longtemps, et aussi parce que la résistance des métaux chauffés est moindre que celle des métaux froids; enfin, parce qu'on peut ignorer certains défauts qui existent dans le fer. Il faut donc multiplier par 10 l'épaisseur que l'on obtient comme correspondante au point de rupture, et il vient :

	Epaisseur pour la rupture. centimètres.	Epaisseur pour résister indéfiniment. centimètres.
Pour le fer. . $e = \frac{5.165 \times 50}{4000}$	= 0.0645 . .	0.645
Pour le cuivre : $e = \frac{5.165 \times 50}{2000}$	= 0.1290 . .	1.290

Pour la fonte : $e = \frac{5.165 \times 50}{1350} = 0.191 \ldots 1.91$

La pression de la vapeur dans le sens de l'axe s'obtient en remarquant que, quelle que soit la forme du fond, la pression qu'il supporte est la même que s'il était plat, auquel cas sa surface serait πr^2, et la charge $\pi r^2 P$.

Cette charge se répartit sur tous les points de la circonférence pour produire la rupture du cylindre perpendiculairement à l'axe : or, la circonférence est $2\pi r$, chaque point supporte donc :

$$\frac{\pi r^2 P}{2\pi r} = \frac{P r}{2}$$

La pression longitudinale est donc moitié de la pression transversale; par conséquent, il n'y a lieu à s'occuper de l'épaisseur des chaudières que pour la résistance à la pression transversale.

Il résulte de ce principe, que les chaudières sphériques peuvent, à épaisseurs de tôle égales, supporter des pressions doubles de celles que supportent les chaudières cylindriques.

L'épaisseur des tôles, au milieu des feuilles, étant déterminée, il reste à savoir si cette épaisseur peut convenir sur les bords, là où les feuilles s'assemblent entre elles au moyen de rivets qui les traversent de part en part et répartissent la pression totale sur les espaces pleins qui existent entre chacun d'eux.

Or, si l'on examine plusieurs chaudières à vapeur, on remarque que le diamètre des rivets est double de l'épaisseur de la tôle, et que l'espacement entre les rivets, d'axe en axe, est égal à 5 fois l'épaisseur de la tôle.

Pour bien nous rendre compte de l'épaisseur qu'il convient d'avoir sur les bords proportionnellement à celle du milieu des feuilles, soient AB, CD (*fig.* 12) deux feuilles de tôle assemblées.

Appelons l la largeur EF en centimètres; e l'épaisseur en centimètres, au milieu, comme par le passé; R la résistance par centimètre quarré de section, nous avons :

Résistance en EF $= le \times R$.

Soit E' F' une droite traversant tous les rivets, et soit $\frac{l}{n}$ la somme des diamètres de rivets compris dans la longueur l,

c'est-à-dire la somme des vides, $l - \frac{l}{n}$ est la partie pleine de la section E'F', et on a :

$$\text{Résistance en E'F'} = \left(l - \frac{l}{n}\right) e' R$$

e' étant l'épaisseur à l'endroit des rivets. Or, les résistances doivent être égales, on a donc :

$$l e R = \left(\frac{n-1}{n}\right) l e' R$$

d'où :
$$e' = \frac{n e}{n - 1}$$

Nous avons dit que l'espacement des rivets, de centre en centre, était égal à 5 fois l'épaisseur de la tôle, donc $5e'$; que le diamètre était 2 fois l'épaisseur, donc $2e'$; pour avoir n, nous remarquons que, sur une longueur égale à $5e'$, il y a $2e'$ de vide, donc $\frac{l}{n} = \frac{2}{5} l$ d'où $n = \frac{5}{2}$;

$$e' = \frac{{}^5/_2\, e}{{}^5/_2 - 1} = {}^5/_3\, e = 1.666\ e$$

Mais on n'est pas dans l'usage de donner plus d'épaisseur aux tôles sur les bords que dans le milieu, par suite du mode de fabrication même de ces dernières; il en résulte que l'épaisseur des feuilles doit être celle que l'on trouve comme nécessaire sur les bords, et si les dimensions que nous avons données plus haut ne font que compenser les vices que nous avons signalés alors, elles doivent être augmentées dans la proportion que nous venons d'indiquer, et l'on a :

Pour fer. . $e' = 1.666 \times 0.^{cm}645 = 1.^{cm}08$;
cuivre $e' = 1.666 \times 1.\ 290 = 2.\ 15$;
fonte $e' = 1.666 \times 1.\ 910 = 3.\ 18$.

Les épaisseurs que les chaudronniers sont obligés de donner aux chaudières à vapeur, en exécution des *ordonnances royales* relatives aux appareils à vapeur, n'ont pas été calculées de la manière que nous venons de le faire.

Ces épaisseurs, pour la tôle de fer, sont déterminées par la formule :

$$e = \frac{18\,d\,(n-1) + 3000}{1000} \text{ millimètres.}$$

d étant le diamètre de la chaudière exprimé en centimètres, et n le nombre total d'atmosphères indiquant la pression intérieure.

Si nous appliquons cette formule à l'exemple que nous avons pris, nous aurons :

$$e = \frac{18 \times 100\,(6-1) + 3000}{1000} = 12 \text{ millimètres.}$$

Ainsi, là où nous trouvons 10.^{mm}8, les ordonnances royales exigent 12 millimètres.

En général, les épaisseurs données par la formule ci-dessus sont plus considérables que celles données par la formule que nous avons obtenue, bien que nous ayons décuplé la valeur de e.

Comparant les deux formules, la première devient :

$$e = 1.666 \times 10 \frac{r\,P}{4000} = 0.00416\,r\,P$$

$$= 0.00208 \times 1.033 \times (n-1)\,d$$

$$= 0.00215\,d\,(n-1) \text{ en centim.}$$

$$= 0.0215\,d\,(n-1) \text{ en millim.}$$

La seconde devient :

$$e = 0.018\,d\,(n-1) + 3 \text{ en millimètres.}$$

La première donne pour e une valeur constamment proportionnelle au diamètre et à la pression, tandis que la seconde non-seulement est proportionnelle au diamètre et à la pression, mais encore exige une épaisseur constante de 3 millimètres en plus, quels que soient le diamètre et la pression.

Il résulte de là, que les épaisseurs données par la première formule, d'abord plus petites que celles données par la seconde formule, pour des petites valeurs de d et de n, vont en se rapprochant de plus en plus de celles que l'on déduit de la seconde, à mesure que le produit $d\,(n-1)$ croît ; puis, enfin, deviennent égales à ces dernières, et les dépassent de plus en plus pour des valeurs toujours croissantes du produit $d\,(n-1)$.

Afin de déterminer à quelle valeur du produit $d\,(n-1)$ correspondent des valeurs égales pour e dans les deux formules, posons :

$$0.0215\,d\,(n-1) = 0.018\,d\,(n-1) + 3$$

il vient :

$$0.0035\,d\,(n-1) = 3$$

et :
$$d(n-1) = \frac{3}{0.0035} = 857.$$

Ainsi, d étant exprimé en centimètres et n en atmosphères, lorsque le produit $d(n-1)$ dépasse 857, les valeurs de e données par notre formule sont plus fortes que celles données par la formule des ordonnances royales.

Afin de voir quelles conséquences peut avoir ce résultat, donnons à d et à n des valeurs *maxima :* soit $n = 7$ qui est un des plus hauts timbres de chaudières, $d = 150$ centimètres qui est aussi un des plus grands diamètres, il vient :

$$d(n-1) = 150 \times 6 = 900 > 857.$$

Pour $d = 120$ centimètres, plus usité :

$$d(n-1) = 120 \times 6 = 720 < 857.$$

Rarement on dépasse $d = 100$ centimètres,
$n = 6$ atmosphères,

ce qui donne $d(n-1) = 100 \times 6 = 600 < 857$; d'où nous concluons que la formule du gouvernement offre plus de sûreté que la nôtre, en ce sens que, exigeant une plus forte épaisseur pour les chaudières, elle les met en mesure de résister beaucoup mieux aux excès de pression qui ont lieu quelquefois.

S'il pouvait y avoir un grand excès de poids dans l'emploi de la formule du gouvernement, nous dirions que pour locomotives, il serait à désirer que l'on permît d'employer la première formule, parce que, d'une part, les tôles employées sont toujours de qualité supérieure ; ensuite, parce que l'on a besoin de diminuer autant que possible le poids. Mais la différence est très-minime, comme nous allons en juger.

La surface de tôle de fer nécessaire à la boîte à feu et à la partie cylindrique est de 20 mètres quarrés environ.

Le timbre des locomotives est 5 atmosphères.

Le diamètre de la partie cylindrique est $1.^{m}10$ environ.

On a par la première formule :

$$e = 0.0215 \times 110 \times 4 = 9.^{m.m}45$$

et par la seconde formule :

$$e' = 0.018 \times 110 \times 4 + 3 = 10.^{m.m}90$$

Dans le premier cas, le poids de la tôle est :

$20 \times 0.^{m}00945 \times 7800 = 1475$ kil.

$^{1}/_{5}$ en sus pour rivets et recouvrements
des joints. 295
Total. . . . 1770 kil.

Dans le deuxième cas, le poids de la tôle est :

$20 \times 0.^{m}0109 \times 7800 = 1600$ kil.

$^{1}/_{5}$ en sus pour rivets et recouvrements
des joints. 320
Total. . . . 1920 kil.

Différence 150 kilogrammes sur des objets dont les poids varient entre 15 et 16 mille kilogrammes.

§ 2. — APPAREILS DE SURETÉ.

Ces appareils sont destinés à prévenir les explosions qui résultent d'une pression intérieure, supérieure à celle que la résistance des parois de la chaudière leur permet de supporter.

Jusqu'ici, il n'a pas été possible de rendre les chaudières inexplosibles, c'est-à-dire, ou assez résistantes pour supporter toute espèce de pression, ou susceptibles de donner instantanément un dégagement considérable à la vapeur, quand la pression intérieure dépasse les limites de pression convenable.

On a donc dû s'attacher, faute de mieux, à atténuer les causes qui peuvent donner lieu à des accroissements illimités de pression.

Or, ces causes sont de deux espèces, savoir :

1° Une production lente de vapeur supérieure à la quantité de cette dernière dépensée ;

2° Une production instantanée d'une très-grande quantité de vapeur.

Dans le premier cas, la pression dans la chaudière s'élève graduellement, et l'explosion commence par une rupture à la partie la moins résistante.

Dans le second cas, l'explosion a lieu à la fois sur tous les points dont la résistance est inférieure à la pression exercée instantanément, quelles que soient d'ailleurs les résistances de ces points les unes par rapport aux autres.

1° AUGMENTATION LENTE DE PRESSION.

L'augmentation lente de pression est le cas qui se présente le plus souvent dans l'emploi des appareils à vapeur, aussi est-ce cet effet que l'on s'est, en premier lieu, proposé d'annuler autant que possible.

Pour cela, on a adapté aux chaudières les appareils suivants, savoir :

Les *soupapes de sûreté ;*

Les *rondelles fusibles ;*

Les *manomètres.*

Soupapes de sûreté. — On donne ce nom à des soupapes ouvrant de bas en haut et placées sur la partie supérieure de la chaudière, de manière à être toujours en contact avec la vapeur. Ces soupapes sont chargées d'un poids égal à la pression *maxima* que doit posséder la vapeur dans la chaudière, de manière que quand la pression intérieure surpasse la charge des soupapes, ces dernières se soulèvent et donnent issue à cette vapeur.

Le diamètre des soupapes varie suivant les dimensions de la chaudière à laquelle elles sont adaptées; car il ne suffit pas qu'elles donnent issue à la vapeur, il faut encore que la quantité de vapeur qu'elles laissent écouler soit au moins égale à la quantité de cette dernière, produite en trop et donnant lieu à l'augmentation de pression.

Pour calculer le diamètre que l'on doit donner aux soupapes, suivant les chaudières, on admet un maximum pour la quantité de vapeur que peut produire un mètre quarré de surface de chauffe dans un temps donné, et on donne à la soupape un diamètre suffisant pour que, étant ouverte, elle puisse laisser échapper la même quantité de vapeur. Il résulte de là que sitôt que la soupape se lève, la pression intérieure diminue et la soupape retombe.

Pour trouver ces diamètres, on procède de la manière suivante, soient :

P, la quantité *maxima* de vapeur, en poids, que peut donner un mètre quarré de surface de chauffe ;

n, le nombre de mètres quarrés de surface de chauffe de la chaudière;

h, la hauteur de mercure équivalente à la pression intérieure de la chaudière.

On a pour la vitesse d'écoulement des fluides :

$$v = \sqrt{2gH}$$

H étant la hauteur génératrice de l'écoulement en colonne du fluide qui s'écoule.

Si D est le diamètre de la soupape, et *d* le poids du mètre cube de vapeur à la pression *h*, on a :

$$0.785\,D^2 H \times d = 0.785\,D^2 (h - 0.^m76)\,13590 \quad (1)$$

d'où :
$$H = \frac{13590}{d}(h - 0.76)$$

et
$$v = \sqrt{19.62 \times 13590 \frac{h-0.76}{d}} = 510 \sqrt{\frac{h-0.76}{d}}$$

Le volume écoulé par seconde est alors, en mince paroi :

$$V = 0.65\,v \times 0.785\,D^2$$

$$= 0.65 \times 0.785 \times 510\,D^2 \sqrt{\frac{h-0.76}{d}}$$

$$= 260\,D^2 \sqrt{\frac{h-0.76}{d}}$$

d'où :
$$D^2 = \frac{V}{260 \sqrt{\frac{h-0.76}{d}}}$$

D'autre part, si m représente le nombre de mètres quarrés de surface de chauffe de la chandière, on a :

$$mP = Vd \qquad \text{d'où} \qquad V = \frac{mP}{d}$$

et :
$$D^2 = \frac{mP}{260\sqrt{d\,(h-0.76)}} \text{ en mètres.}$$

Reste à déterminer P.

M. *Péclet*, dans son *Traité de la chaleur*, admet que un mètre quarré de surface de chauffe peut produire, au maximum, 200 kilogrammes de vapeur par heure, ce qui fait par seconde $0.^{k}0555$.

Nous n'admettrons, quant à nous, aucun nombre, par la raison que les diamètres à donner aux soupapes des chandières à vapeur ont été réglés par ordonnance royale, et qu'il n'y a lieu à faire usage de la formule ci-dessus qu'autant qu'elle donne pour D des valeurs supérieures à celles exigées par la table annexée à ladite ordonnance, et dont voici une copie :

(1) La charge sur l'orifice d'écoulement, exprimée par le poids d'une colonne de fluide sur cet orifice, est égale à la charge, sur cet orifice, d'une colonne de mercure ayant la hauteur $h - 0.^m76$.

TABLE *pour régler les diamètres à donner aux orifices des soupapes de sûreté.*

SURFACES de chauffe des chaudières.	NUMÉROS DES TIMBRES INDIQUANT LES TENSIONS DE LA VAPEUR.									
	1 ½ atmosphères.	2 atmosphères.	2 ½ atmosphères.	3 atmosphères.	3 ½ atmosphères.	4 atmosphères.	4 ½ atmosphères.	5 atmosphères.	5 ½ atmosphères.	6 atmosphères.
mèt. car.	centim.	centim.	centim	centim.	centim.	centim.	centim	centim.	centim.	centim.
1	2.493	2.063	1.799	1.616	1.479	1.372	1.286	1.214	1.152	1.100
2	3.525	2.918	2.544	2.285	2.092	1.941	1.818	1.716	1.630	1.555
3	4.317	3.573	3.116	2.799	2.563	2.377	2.227	2.102	1.996	1.905
4	4.985	4.126	3.598	3.232	2.959	2.745	2.572	2.427	2.305	2.200
5	5.574	4.613	4.023	3.614	3.308	3.069	2.875	2.714	2.578	2.459
6	6.106	5.054	4.407	3,958	3.624	3.362	3.149	2.973	2.823	2.694
7	6.595	5.458	4.760	4.276	3.914	3.631	3.402	3.211	3.045	2.910
8	7.030	5.835	5.089	4.571	4.185	3.882	3.637	3.433	3.260	3.111

9	7.478	6.189	5.398	4.848	4.438	4.117	3.857	3.641	3.458	3.299
10	7.882	6.524	5.690	5.110	4.679	4.340	4.066	3.838	3.645	3.478
11	8.267	6.843	5.967	5.360	4.907	4.552	4.265	4.025	3.823	3.648
12	8 635	7.147	6.253	5.598	5.125	4.754	4.454	4.204	3 993	3.810
13	8.987	7.439	6 487	5.827	5.334	4.949	4.636	4.376	4 156	3.965
14	9.325	7.720	6.732	6.047	5.536	5.138	4.811	4.541	4.312	4.124
15	9.654	7.990	6.968	6.259	5.730	5.316	4.980	4.701	4.464	4.259
16	9.970	8.253	7 197	6.464	5.918	5.490	5.143	4.854	4.610	4.399
17	10.277	8.506	7 418	6.665	6.100	5.659	5.302	5.004	4.752	4.534
18	10.575	8.753	7.653	6.841	6.277	5.823	5.455	5.149	4.890	4.666
19	10.865	8.993	7.842	7.044	6.449	5 982	5.605	5.290	5.024	4.794
20	11.147	9.227	8 046	7.227	6.616	6.138	5.750	5.428	5.154	4.918
21	11.423	9.454	8.245	7.389	6.780	6.289	5.892	5.561	5.282	5.040
22	11.691	9.677	8.439	7.580	6.939	6.437	6.031	5.692	5.406	5.158
23	11.954	9.894	8 629	7.750	7.095	6.582	6.167	5.820	5.527	5.274
24	12.211	10.107	8 814	7.917	7.248	6.723	6.299	5.845	5.646	5 388
25	12.463	10 316	8 996	8.080	7.397	6.862	6.429	6.069	5.763	5 499
26	12.710	10.520	9.174	8.240	7.544	6 998	6.556	6.188	5.877	5.608
27	12.952	10.720	9.349	8.397	7.776	7.132	6.681	6.306	5 989	5.715
28	13.190	10.917	9 520	8.551	7.828	7 262	6.804	6.422	6.099	5.819
29	13.423	11.110	9.689	8.703	7.967	7 391	6 924	6.535	6.207	5.922
30	13.653	11.300	9.855	8.851	8.103	7.517	7.043	6.648	6 313	6.024

Cette table a été calculée au moyen de la formule :

$$D' = 2.6 \sqrt{\frac{m}{n - 0.412}} \text{ en centimètres.}$$

n étant le numéro du timbre de la chaudière.

Le coefficient 2.6 remplace 1.3, parce que l'on observe que la soupape ne s'ouvre jamais entièrement quand elle donne issue à la vapeur ; le diamètre se trouve alors doublé, et la section d'écoulement quadruplée.

Adoptant cette méthode, notre formule devient, tous calculs faits :

$$D = 100 \sqrt{\frac{m\,P}{65 \sqrt{d\,(h - 0.76)}}} \text{ en centimètres.}$$

Soit $D = D'$, nous obtiendrons la valeur de P qui a servi de base à la formule des ordonnances royales, en posant :

$$6.76 \frac{m}{n - 0.412} = \frac{10000 \times m\ \ P}{65 \sqrt{d \times 0.76\,(n - 1)}}$$

car :

$$h = 0.76 \times n$$

il vient :

$$P = \frac{6.76 \times 65 \sqrt{d \times 0.76\,(n - 1)}}{(n - 0.412)\,10000}$$

$$= \frac{0.0384 \sqrt{d\,(n - 1)}}{n - 0.412}$$

Plus n est grand, plus d est grand, plus aussi $d\,(n - 1)$ est grand ; mais $n - 0.412$ croît aussi, il n'est donc pas possible de déterminer dans quel rapport P croît avec n.

Pour . . .	$n = 1$	$P = 0$
	$n = 2$	$P = 0{,}0255$ kil.
	$n = 3$	$P = 0{,}0266$
	$n = 4$	$P = 0{,}0271$
	$n = 5$	$P = 0{,}0268$
	$n = 6$	$P = 0{,}0270$

En moyenne, $P = 0{,}0265$ donne dans notre formule des résultats à peu près identiques avec la formule du gouvernement, et on a :

$$D = 2 \sqrt{\frac{m}{\sqrt{d\,(h - 0.76)}}}$$

Soit proposé, pour exemple, de trouver le diamètre d'une soupape de sûreté pour surface de chauffe = 20 mètres quarrés, et pression intérieure = 5 atmosphères,

on a : $$D = 2 \sqrt{\frac{20}{\sqrt{2.57 \times 4 \times 0.76}}} = 5.18^{\text{c.m.}}$$

au lieu de 5.42 que donne la table.

$0.^{k}0265$ par seconde fait par heure $3600 \times 0.0265 = 95$ kilog. au lieu de 200 kilog. qu'admet M. *Péclet*. Il est vrai que les soupapes sont toujours accouplées deux à deux sur une même chaudière.

Charge des soupapes.

Il y a deux manières de charger les soupapes :

1° Directement ;

2° Par l'intermédiaire d'un levier.

En principe, les soupapes sont chargées directement, quand la charge ne doit pas être considérable ; mais en réalité, la charge directe a été forcément appliquée jusqu'en 1843 à toutes les chaudières dites à basse pression, par suite de l'ordonnance royale du 25 mars 1830.

Les soupapes à levier, précédemment réservées pour les chaudières à haute pression, sont maintenant admises pour toute espèce de chaudière.

Pour calculer la charge qui doit être placée à l'extrémité du levier, afin de faire équilibre à la pression de la vapeur correspondante au numéro du timbre de la chaudière, on procède de la manière suivante :

Soient : P la charge,
D le diamètre de la soupape en centimètres,
m le rapport du bras de levier,
n le numéro du timbre.

La pression de la vapeur sur la soupape est : $0.785\ D^2 \times 1^{k}.033\ (n-1)$. On a alors :

$$P \times m = 1 \times 0.785\ D^2 \times 1.^{k}033\ (n - 1)$$

et ; $$P = \frac{0.811\ D^2\ (n-1)}{m}$$

Si $m = 1$, la charge est directe, et on a :

$$P = 0.811 \, D^2 (n - 1)$$

En prenant pour D le diamètre intérieur de la soupape, on obtient pour P une valeur plus faible que celle qui est convenable pour faire équilibre à la pression intérieure. Il résulte des expériences de M. *Tremery*, ex-ingénieur en chef, directeur des mines, que la surface de l'anneau de recouvrement joue un grand rôle dans le soulèvement plus ou moins prompt des soupapes, et qu'au lieu de la formule ci-dessus, il faut employer la suivante :

$$P = \frac{0.811}{m}\left(\frac{D^2 + d^2}{2}(n - 1) - \frac{D^2 - d^2}{2}\right)$$

dans laquelle D est le diamètre extérieur de la zône de contact, ou anneau de recouvrement, et d le diamètre de l'orifice.

On obtient pour P des valeurs très-rapprochées de celles données par cette formule en prenant pour valeur de D, dans la première, le diamètre moyen, c'est-à-dire le diamètre de l'orifice, plus l'épaisseur du contact.

Rondelles fusibles. Ce sont des alliages de *plomb*, *bismuth* et *étain* en proportions déterminées pour fondre à la température correspondante à la pression *maxima* que doit supporter la chaudière.

Ces rondelles, fort ingénieuses sous le point de vue théorique, n'ayant donné que de médiocres résultats depuis vingt ans qu'elles sont prescrites par les premières ordonnances royales, ont cessé de l'être dans les nouvelles.

Manomètres. Ils sont destinés à indiquer au chauffeur la pression intérieure de la chaudière, et sont de deux espèces, savoir :

1° Les manomètres à air libre,

2° Les manomètres à air comprimé.

Les premiers consistent en un long tube de verre recourbé, ouvert à chaque extrémité et communiquant d'une part avec la chaudière à vapeur, de l'autre avec l'atmosphère. A la partie inférieure du coude se trouve une quantité suffisante de mercure pour que, la vapeur pressant d'un côté, le mercure s'élève dans l'autre branche à une hauteur susceptible de faire équilibre à cette pression.

Sachant que la pression de 1 atmosphère est équivalente à la charge d'une colonne de mercure dont la hauteur est 0.m76,

on donne à la branche qui communique avec l'air une longueur verticale suffisante pour que le mercure puisse s'y élever à autant de fois o.^{m}76 qu'il y a d'unités moins une dans le numéro du timbre de la chaudière, ce numéro indiquant la pression totale intérieure.

Lorsque les deux branches sont égales, le mercure descend d'autant dans l'une qu'il monte dans l'autre, et alors chaque atmosphère est indiquée sur la branche en communication avec l'air par une hauteur de o.^{m}38. Ces manomètres, exigés par les anciennes ordonnances royales pour les chaudières dites à basse pression seulement, le sont, par les nouvelles ordonnances, pour toutes les chaudières, quelle que soit leur pression.

Les manomètres à air comprimé sont fondés sur ce principe : que les *volumes des gaz sont en raison inverse des pressions et proportionnels aux températures.*

Soit bc (*fig.* 13) un cylindre d'air renfermé dans un tube bouché à l'extrémité c et recourbé inférieurement. Soit $a'b$ le niveau du mercure dans les deux branches, sous la pression h et à t^o du thermomètre centigrade.

Pour avoir le volume du gaz à la pression h' et la température t', on a :

$$V' = V \frac{h}{h'} \times \frac{(1 + at')}{(1 + at)}$$

Si H et H' sont les hauteurs cb, ce correspondantes à ces volumes, on a :

$$H' = H \frac{h}{h'} \times \frac{1 + at'}{1 + at}$$

Soient : s la section en bb',
S la section en aa'.

La colonne de mercure a monté dans la branche bc d'une hauteur égale à H—H', et a baissé dans la branche ad d'une hauteur égale à $\frac{s}{S}(H-H')$; la différence de niveau entre les deux branches est donc :

$$H - H' + \frac{s}{S}(H - H') = (H - H')\left(1 + \frac{s}{S}\right)$$

Cette hauteur de mercure opère contre la pression de la vapeur une charge qui diminue d'autant la pression du gaz comprimé, et si l'on ne tenait pas compte de cette charge, la hauteur H' du volume comprimé indiquerait une pression de vapeur inférieure à la pression exacte. La pression h' n'est donc que la différence entre la pression qui a lieu dans la chaudière et la charge du mercure en sens contraire.

Soit h_1 la pression en mercure dans la chaudière, on a :

$$h' = h_1 - (H - H')\left(1 + \frac{s}{S}\right)$$

Remplaçant h' par cette valeur dans l'expression de H', il vient :

$$H' = H \frac{h}{h_1 - (H - H')\left(1 + \frac{s}{S}\right)} \times \frac{1 + at'}{1 + at}$$

En résolvant par rapport à H', on obtient une équation du second degré.

En admettant pour t' et t des valeurs constantes et égales entre elles, en supposant S infiniment grand par rapport à s, et faisant $h = 0.^m76$, il vient :

$$H' = H \frac{h}{h_1 - H + H'}$$

d'où : $$H'^2 + H'(h_1 - H) - hH = 0$$

et : $$H' = -\frac{h_1 - H}{2} \pm \sqrt{\frac{(h_1 - H)^2}{4} + hH}$$

Pour des valeurs données à h_1 on en déduit des valeurs pour H'.

Mais quelque simplifiée et quelqu'inexacte que soit cette valeur de H', elle est encore trop compliquée pour les fabricants de manomètres; de plus les diamètres des tubes n'étant pas mathématiquement constants partout, le mercure y monte irrégulièrement; enfin, le mercure se dérange souvent et le volume d'air primitivement introduit change.

Il résulte de là que, sur cent manomètres à air comprimé, il s'en rencontre au plus un exact, et encore cela n'a lieu que si

ce dernier a été construit spécialement à un prix fort élevé et non en fabrique.

Si donc le manomètre est utile, et nous le regardons comme indispensable, c'est une sage décision que celle qui a été prise dans les nouvelles ordonnances, d'exiger le manomètre à air libre partout.

2° AUGMENTATION INSTANTANÉE DE PRESSION.

L'augmentation instantanée de pression provient généralement d'une alimentation intermittente et se faisant à des époques assez éloignées les unes des autres pour que le niveau de l'eau, dans la chaudière, s'abaisse au-dessous du niveau supérieur des carnaux et permette à la partie supérieure de la chaudière en contact avec les carnaux de se chauffer à une température de beaucoup supérieure à celle d'ébullition.

Une autre cause de l'augmentation instantanée de pression est dans l'impossibilité qu'éprouve la vapeur à s'échapper d'un point où elle se produit pour s'élever dans la partie supérieure de la chaudière. Dans ce cas, elle s'accumule en ce point, en chasse l'eau, permet alors à la paroi de s'échauffer et si, à force d'augmenter de volume, elle finit par rencontrer une issue, elle s'échappe en grande partie, diminue de volume et permet à l'eau de toucher subitement une paroi quelquefois chauffée au rouge, d'où résulte une production considérable de vapeur et une pression proportionnelle.

C'est en partie à cet effet qu'est dû le terrible accident du bateau à vapeur le *Citis*.

Pour remédier à ces effets funestes, il y a trois objets à considérer :

1° La disposition des chaudières,

2° Les appareils d'alimentation,

3° Les appareils propres à indiquer le niveau dans les chaudières.

1° *Disposition des chaudières*. Les chaudières doivent être placées dans les fourneaux de manière que le niveau supérieur du liquide soit à 10 centimètres au moins au-dessus des canaux de circulation de la fumée.

Les tubes bouilleurs ou les tubes de fumée circulant dans l'intérieur des chaudières, doivent être disposés de telle sorte que la vapeur qui se produit dans les différents points, en contact avec le feu, puisse facilement s'élever à la partie supérieure.

Jusqu'ici, aucune condition n'a été prescrite par les ordon-

nances royales pour la disposition des chaudières à vapeur, cela afin de ne pas entraver l'industrie dans les progrès qu'elle fait tous les jours sur ce point. On ne peut donc que déplorer les accidents qui ont été la conséquence de dispositions vicieuses, et engager les constructeurs à disposer leurs chaudières de manière à satisfaire aux exigences que nous avons signalées.

2° *Appareils d'alimentation.* Ils sont de deux espèces, savoir :

Les appareils d'alimentation intermittente;

Les appareils d'alimentation continue.

Les premiers, spécialement employés pour les chaudières à vapeur qui n'alimentent pas de machines, consistent, le plus généralement, en un vase en tôle A (*fig.* 14), communiquant, au moyen de deux tuyaux B, C, avec une chaudière à vapeur D, l'un B partant de la partie supérieure de A et aboutissant à la partie supérieure de D; l'autre C partant de la partie inférieure de A et aboutissant à la partie inférieure de D.

Supposant A plein d'eau froide, si on ferme le robinet E, puis qu'on ouvre le robinet B, la vapeur s'introduit dans le vase A et y établit une pression égale à celle qui a lieu dans l'intérieur de la chaudière. Ouvrant alors le robinet C, l'eau de A s'écoule dans D.

Pour remplir A, on ferme B et C, laisse refroidir, et ouvre E par où on verse de l'eau.

M. *Combes*, ingénieur en chef des mines du département de la Seine, vient de prescrire aux blanchisseurs un appareil d'alimentation intermittente des plus ingénieux.

A (*fig.* 16) est une chaudière fermée dans laquelle chauffe une lessive caustique. Quand l'eau est suffisamment chaude, elle se convertit en vapeur, et la portion liquide restante est chassée hors de la chaudière par le tube B, plongeant jusqu'au fond de la chaudière. Cette eau tombe sur du linge dont est rempli le cuvier D, le traverse et vient se réunir à la partie inférieure.

En S est une soupape à deux flotteurs *f* et *f'* fixés sur sa tige. Cette soupape est contre-balancée par un poids P, de telle manière que quand le flotteur *f'* plonge seul, la soupape est en équilibre et reste dans la position où on la place.

De plus, les volumes et poids de ces flotteurs sont tels, que quand les deux flotteurs plongent, la soupape est fermée, et quand ni l'un ni l'autre ne plongent, la soupape est ouverte.

Il résulte de là que quand le niveau de l'eau s'est abaissé assez pour que le flotteur *f'* ne plonge plus, la soupape tombe

et établit la communication avec l'air extérieur; alors, s'il se produit de la vapeur, elle s'échappe par la soupape, et si les parois se chauffent au rouge, l'eau injectée sur ces parois ne peut produire d'explosion, parce que la vapeur produite instantanément trouve une issue suffisante. La communication avec l'air étant établie, l'eau amassée à la partie inférieure du cuvier presse sur le clapet *c* que tenait fermé précédemment la pression intérieure de A, l'ouvre et s'écoule dans la chaudière. Alors le niveau s'élève dans cette dernière, et comme il y a équilibre entre la soupape et le poids P, tant que le flotteur *f'* plonge seul, la soupape ne bouge pas et le remplissage se fait facilement, jusqu'au moment où le niveau de l'eau s'élève au-dessus du flotteur *f*; alors, le contre-poids l'emportant, la soupape se ferme, et les mêmes effets que ceux indiqués précédemment ont lieu, c'est-à-dire que l'eau se réchauffe, se convertit en vapeur, ferme le clapet *c* et chasse la lessive par le tuyau B, etc.

Les appareils d'alimentation continue sont des pompes aspirantes et foulantes que l'on adapte aux machines à vapeur, pour lesquelles nous renvoyons à la mécanique industrielle. Les pompes à bras sont quelquefois employées pour l'alimentation intermittente.

Lorsque les chaudières de chauffage nécessitent une alimentation continue, on leur adapte quelquefois, comme l'ont fait MM. *Bourdon* et *Cavé*, mécaniciens de Paris, des petites pompes mues par une petite machine à vapeur de la force suffisante pour les mouvoir, et alimentées par la chaudière elle-même.

3° *Niveaux d'eau*. Ils sont de plusieurs espèces, savoir :

Les niveaux en verre;
Les niveaux à robinets;
Les niveaux à flotteurs;
Les niveaux à sifflet.

Niveaux en verre. Ils consistent en un tube de verre, vertical, communiquant par ses deux extrémités avec la chaudière à vapeur, de manière que la communication supérieure ait lieu en pleine vapeur, et la communication inférieure en pleine eau. L'eau prend dans ce tube le même niveau que dans la chaudière, et il est facile de le vérifier à chaque instant.

Ces niveaux présentent l'inconvénient de se casser, et alors de laisser échapper à la fois des masses d'eau et de vapeur qui

les rendent inabordables pour boucher les fuites. On leur adapte bien des robinets qui se manœuvrent de loin, mais c'est compliqué et jamais en mesure de fonctionner quand on en a besoin.

Niveaux à robinets. Ils consistent en 3 robinets (*Pl.* XIX, *fig.* 20 et 21) placés, le premier à 5 centimètres au-dessus du niveau voulu de l'eau; le second au niveau voulu de l'eau; le troisième à 5 centimètres au-dessous. En ouvrant ces robinets, on constate facilement si le niveau de l'eau est entre les deux robinets extrêmes, ce qui est suffisant.

Niveaux à flotteur. Ils consistent en deux poids suspendus aux extrémités d'un levier, et tels que l'un de ces poids, dans l'air, fait équilibre à l'autre plongeant aux trois-quarts dans l'eau.

Le levier étant horizontal, quand l'eau est au niveau voulu, si ce niveau monte, le contre-poids, dans l'air, baisse; si le niveau baisse, ce contre-poids monte.

Ces niveaux se construisent de deux manières, savoir :

1° Le levier est sur la chaudière, et alors le poids qui plonge dans l'eau est suspendu à un fil de cuivre passant au travers d'un stuffing-box. Ces niveaux sont les plus employés, comme les plus commodes; mais ce ne sont pas les plus exacts, à cause du frottement du fil de cuivre dans le stuffing-box.

2° Le levier est composé de deux parties : l'une extérieure, placée sur la face verticale en dessus de la porte du foyer, et fixée à l'extrémité d'un arbre entrant dans la chaudière qu'il traverse, au moyen du stuffing-box; l'autre intérieure, et fixée à l'autre extrémité. Par ce moyen, il n'y a de frottement que celui de l'arbre dans le stuffing-box, frottement dont le bras de levier, au lieu d'être égal à celui du poids plongeant, n'en est que le vingtième au plus.

Niveaux à sifflets. Ils consistent en un sifflet placé à la partie supérieure d'une chaudière sur un trou fermé par une petite soupape à laquelle est suspendu un flotteur, ou mieux, un point du bras de levier d'un flotteur, de manière que quand le niveau baisse, le flotteur baissant, la soupape s'ouvre et la vapeur siffle, ce qui suffit pour avertir le chauffeur, dans le cas où il ne se serait pas aperçu de l'abaissement de niveau.

Ce dernier appareil, que chaque mécanicien exécute différemment, suivant son idée, est exigé par les nouvelles ordonnances royales, et cela est d'autant mieux, qu'il résume en lui seul tous les autres.

M. *Bourdon*, mécanicien à Paris, construit, depuis plusieurs années, un flotteur à sifflet qui a l'avantage d'indiquer en même temps le niveau de l'eau dans la chaudière, et que nous considérons comme un des meilleurs en raison de sa construction qui assure sa sensibilité.

Nous pensons qu'on emploierait avec succès, pour le même objet, l'appareil suivant :

AB (*Pl.* III, *fig.* 15) est le niveau de l'eau dans la chaudière. Soit *c* une boule creuse surmontée d'une soupape *s*, et placée, ainsi que cette soupape, dans une boîte communiquant avec l'intérieur de la chaudière au moyen d'un tuyau D terminé inférieurement par une section inclinée à son axe. Lorsque le niveau de l'eau descend au-dessous de la partie inférieure du tube D, la vapeur s'introduit dans la boîte D, et s'échappe par la soupape ouverte *s*. S'il y a un sifflet au-dessus de cette soupape, la vapeur agit dessus et prévient le chauffeur. Si alors on introduit de l'eau dans la chaudière jusqu'à ce qu'elle bouche le trou D, la pression intérieure de la chaudière chasse l'eau dans le tube D, et cette dernière soulève la boule, ce qui ferme la soupape. Les choses restent dans cet état tant que le niveau ne baisse pas trop. Cet appareil, analogue à celui employé dans les conduites d'eau pour chasser l'air, a été déjà appliqué aux chaudières à vapeur par M. *Tamizier*, mécanicien à Paris.

§ 3. — ÉPREUVES DES CHAUDIÈRES.

Outre les mesures de sûreté que nous avons signalées ci-dessus comme prescrites par les ordonnances royales dans l'emploi des appareils à vapeur, l'administration exige en sus que tout appareil qui doit être employé à contenir de la vapeur, soit préalablement éprouvé à froid à une pression triple, pour la tôle de fer et de cuivre, et quintuple, pour la fonte, de celle qu'elle devra supporter par la suite.

Ces épreuves se font au moyen de la presse hydraulique, en présence des fonctionnaires de l'administration des mines, et sont constatées par le poinçon qu'ils apposent sur les rivets de la médaille dont sont munis ces appareils, et qui indique en atmosphères à quelle pression *maxima* ils peuvent fonctionner.

Pour procéder à l'épreuve d'un appareil à vapeur, on le remplit d'eau et on le met en communication avec une pompe foulante, après l'avoir préalablement muni d'une soupape à levier, dont on calcule la charge au moyen de la formule que nous avons donnée pour les soupapes de sûreté, en multi-

pliant le poids obtenu par 3 pour les appareils en tôle, et par 5 pour les appareils en fonte, ce qui donne :

Formule pour les appareils en tôle :

$$P = \frac{3 \times 0.811\, D^2 (n - 1)}{m} = \frac{2.43\, D^2 (n - 1)}{m}$$

Formule pour les appareils en fonte :

$$P = \frac{5 \times 0.811\, D^2\ n - 1)}{m} = \frac{4\, D^2 (n - 1)}{m}$$

L'épreuve est terminée lorsque la soupape se soulève et lance une zône d'eau tout autour. Il est important d'attendre ce moment pour cesser la manœuvre de la pompe, parce que, la plupart du temps, les soupapes ferment mal et lâchent des filets d'eau pendant tout le temps de l'épreuve.

§ 4. — ORDONNANCE ROYALE CONCERNANT LES APPAREILS A VAPEUR EN GÉNÉRAL.

Les machines et chaudières à vapeur ont successivement été soumises à diverses mesures de sûreté par les ordonnances des 29 octobre 1823, 7 mai 1828, 22 septembre 1829, 25 mars 1830 et 22 juillet 1839.

Avant 1823, on ne comptait en France qu'un petit nombre de ces appareils, qui se sont beaucoup multipliés depuis.

Le décret du 15 octobre 1810 et l'ordonnance du 14 janvier 1815, relatifs aux établissements insalubres ou incommodes, ne s'étaient occupés des machines à vapeur, qu'ils désignaient sous le nom de pompes à feu, que par rapport aux inconvénients de la fumée pour le voisinage.

L'ordonnance du 29 octobre 1823 prescrivit plusieurs conditions de sûreté ; mais elle ne concernait que les machines à haute pression, celles dans lesquelles la force élastique de la vapeur dépasse deux atmosphères.

Les ordonnances des 7 mai 1828 et 23 septembre 1829 déterminèrent des règles pour les épreuves, et y assujettirent toutes les chaudières à haute pression, ainsi que les tubes bouilleurs, et les cylindres et enveloppes de cylindres des machines.

L'ordonnance du 25 mars 1830 s'occupa spécialement des chaudières à basse pression, où la tension de la vapeur ne dépasse pas deux atmosphères au plus; elle leur appliqua quelques-unes des dispositions déjà prescrites pour la haute

pression, mais en les exemptant des épreuves et de toute condition d'emplacement.

Enfin, l'ordonnance du 22 juillet 1839 a fixé des règles pour les épreuves des chaudières des machines locomotives employées sur les chemins de fer.

Ces règlements faits ainsi à différentes reprises manquaient d'unité et présentaient diverses lacunes. En outre, le temps et l'expérience ont fait reconnaître que, parmi les précautions exigées, il en était quelques-unes que l'on pouvait rendre moins rigoureuses ou même supprimer entièrement; d'autres, au contraire, qu'il convenait d'étendre ou de compléter, de manière à concilier à la fois les intérêts de l'industrie et ceux de la sûreté publique. Il était donc nécessaire de faire un nouveau règlement à l'effet de coordonner toutes les dispositions à prescrire aujourd'hui en cette matière.

Les enseignements de la théorie et de la pratique ont été mis à profit. La Commission centrale des machines à vapeur a exécuté des expériences ayant pour but de vérifier plusieurs moyens de sûreté sur l'efficacité desquels des doutes s'étaient élevés. Les diverses circonstances où des explosions sont arrivées ont été l'objet d'une étude suivie. On a pu remonter aux causes déterminantes de quelques accidents, et reconnaître les moyens de prévenir ou d'atténuer le danger.

ORDONNANCE DU ROI DU 22 MAI 1843,

RELATIVE AUX MACHINES ET CHAUDIÈRES A VAPEUR AUTRES QUE CELLES QUI SONT PLACÉES SUR DES BATEAUX.

Louis-Philippe, roi des Français,

Sur le rapport de notre ministre secrétaire d'État au département des travaux publics;

Vu les ordonnances des 29 octobre 1823, 7 mai 1828, 23 septembre 1829 et 25 mars 1830, concernant les machines et chaudières à vapeur;

L'ordonnance du 22 juillet 1839, relative aux locomotives employées sur les chemins de fer;

Les rapports de la Commission centrale des machines à vapeur établie près de notre ministre des travaux publics;

Notre conseil d'Etat entendu,

Nous avons ordonné et ordonnons ce qui suit :

Article premier. Seront soumises aux formalités et aux mesures de sûreté prescrites par la présente ordonnance, les

machines à vapeur et les chaudières fermées dans lesquelles on doit produire de la vapeur.

Les machines et chaudières établies à bord des bateaux seront régies par une ordonnance spéciale.

TITRE PREMIER.

DISPOSITIONS RELATIVES A LA FABRICATION ET AU COMMERCE DES MACHINES OU CHAUDIÈRES A VAPEUR.

Art. 2. Aucune machine ou chaudière à vapeur ne pourra être livrée par un fabricant, si elle n'a subi les épreuves prescrites ci-après. Lesdites épreuves seront faites à la fabrique, sur la déclaration des fabricants, et d'après les ordres des préfets, par les ingénieurs des mines, ou, à leur défaut, par les ingénieurs des ponts et chaussées.

Art. 3. Les chaudières ou machines à vapeur venant de l'étranger devront être pourvues des mêmes appareils de sûreté que les machines ou chaudières d'origine française, et subir les mêmes épreuves. Ces épreuves seront faites au lieu désigné par le destinataire dans la déclaration qu'il devra faire à l'importation.

TITRE II.

DISPOSITIONS RELATIVES A L'ÉTABLISSEMENT DES MACHINES ET DES CHAUDIÈRES A VAPEUR PLACÉES A DEMEURE AILLEURS QUE DANS LES MINES.

SECTION PREMIÈRE.

DES AUTORISATIONS.

Art. 4. Les machines à vapeur et les chaudières à vapeur, tant à haute pression qu'à basse pression, qui sont employées à demeure partout ailleurs que dans l'intérieur des mines, ne pourront être établies qu'en vertu d'une autorisation délivrée par le préfet du département, conformément à ce qui est prescrit par le décret du 15 octobre 1810 pour les établissements insalubres et incommodes de deuxième classe.

Art. 5. La demande en autorisation sera adressée au préfet. Elle fera connaître :

1° La pression *maximum* de la vapeur, exprimée en atmosphères et en fractions décimales d'atmosphère, sous laquelle les machines à vapeur ou les chaudières à vapeur devront fonctionner ;

2° La force de ces machines exprimée en chevaux (le che-

val-vapeur étant la force capable d'élever un poids de 75 kilogrammes à un mètre de hauteur, dans une seconde de temps);

3° La forme des chaudières, leur capacité, et celle de leurs tubes bouilleurs, exprimées en mètres cubes;

4° Le lieu et l'emplacement où elles devront être établies, et la distance où elles se trouveront des bâtiments appartenant à des tiers et de la voie publique;

5° La nature du combustible que l'on emploiera;

6° Enfin le genre d'industrie auquel les machines ou les chaudières devront servir.

Un plan des localités et le dessin géométrique de la chaudière seront joints à la demande.

Art. 6. Le préfet renverra immédiatement la demande en autorisation, avec les plans, au sous-préfet de l'arrondissement, pour être transmise au maire de la commune.

Art. 7. Le maire procédera immédiatement à des informations *de commodo et incommodo*. La durée de cette enquête sera de dix jours.

Art. 8. Cinq jours après qu'elle sera terminée, le maire adressera le procès-verbal de l'enquête, avec son avis, au sous-préfet, lequel, dans un semblable délai, transmettra le tout au préfet, en y joignant également son avis.

Art. 9. Dans le délai de quinze jours, le préfet, après avoir pris l'avis de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, statuera sur la demande en autorisation.

L'ingénieur signalera, s'il y a lieu, dans son avis, les vices de construction qui pourraient devenir des causes de danger, et qui proviendraient soit de la mauvaise qualité des matériaux, soit de la forme de la chaudière, ou du mode de jonction de ses diverses parties. Il indiquera les moyens d'y remédier, si cela est possible.

Art. 10. L'arrêté par lequel le préfet autorisera l'établissement d'une machine ou d'une chaudière à vapeur indiquera:

1° Le nom du propriétaire;

2° La pression *maximum* de la vapeur, exprimée en nombre d'atmosphères, sous laquelle la machine ou la chaudière devra fonctionner, et les numéros des timbres dont la machine et la chaudière auront été frappées, ainsi qu'il est prescrit ci-après, article 19;

3° La force de la machine, exprimée en chevaux;

4° La forme et la capacité de la chaudière;

5° Le diamètre des soupapes de sûreté, la charge de ces soupapes;

6° La nature du combustible dont il sera fait usage;

7° Le genre d'industrie auquel servira la machine ou la chaudière à vapeur.

Art. 11. Le recours au conseil d'État est ouvert au demandeur contre la décision du préfet qui aurait refusé d'autoriser l'établissement d'une machine ou chaudière à vapeur.

S'il a été formé des oppositions à l'autorisation, les opposants pourront se pourvoir devant le conseil de préfecture contre la décision du préfet qui aurait accordé l'autorisation, sauf recours au conseil d'Etat.

Les décisions du préfet relatives aux conditions de sûreté que les machines ou chaudières à vapeur doivent présenter, ne seront susceptibles de recours que devant notre ministre des travaux publics.

Art. 12. Les machines et les chaudières à vapeur ne pourront être employées qu'après qu'on aura satisfait aux conditions imposées dans l'arrêté d'autorisation.

Art. 13. L'arrêté du préfet sera affiché pendant un mois à la mairie de la commune où se trouve l'établissement autorisé. Il en sera, de plus, déposé une copie aux archives de la commune; il devra, d'ailleurs, être donné communication dudit arrêté à toute partie intéressée qui en fera la demande.

SECTION II.

ÉPREUVES DES CHAUDIÈRES ET DES AUTRES PIÈCES CONTENANT LA VAPEUR.

Art. 14. Les chaudières à vapeur, leurs tubes bouilleurs et les réservoirs à vapeur; les cylindres en fonte des machines à vapeur et les enveloppes en fonte de ces cylindres, ne pourront être employés dans un établissement quelconque sans avoir été soumis préalablement, et ainsi qu'il est prescrit au titre premier de la présente ordonnance, à une épreuve opérée à l'aide d'une pompe de pression.

Art. 15. La pression d'épreuve sera un multiple de la *pression effective*, ou autrement de la plus grande tension que la vapeur pourra avoir dans les chaudières et autres pièces contenant la vapeur, diminuée de la pression extérieure de l'atmosphère.

On procédera aux épreuves en chargeant les soupapes des chaudières de poids proportionnels à la pression effective, et déterminés suivant la règle indiquée en l'article 24.

A l'égard des autres pièces, la charge d'épreuve sera appliquée sur la soupape de la pompe de pression.

Art. 16. Pour les chaudières, tubes bouilleurs et réservoirs en tôle ou en cuivre laminé, la pression d'épreuve sera *triple* de la pression effective.

Cette pression d'épreuve sera *quintuple* pour les chaudières et tubes bouilleurs en fonte.

Art. 17. Les cylindres en fonte des machines à vapeur, et les enveloppes en fonte de ces cylindres, seront éprouvés sous une pression *triple* de la pression effective.

Art. 18. L'épaisseur des parois des chaudières cylindriques en tôle ou en cuivre laminé sera réglée conformément à la table n° 1 annexée à la présente ordonnance.

L'épaisseur de celles de ces chaudières qui, par leurs dimensions et par la pression de la vapeur, ne se trouveraient pas comprises dans la table, sera déterminée d'après la règle énoncée à la suite de ladite table; toutefois, cette épaisseur ne pourra dépasser 15 millimètres.

Les épaisseurs de la tôle devront être augmentées s'il s'agit de chaudières formées, en partie ou en totalité, de faces planes, ou bien de conduits intérieurs, cylindriques ou autres, traversant l'eau ou la vapeur, et servant soit de foyers, soit à la circulation de la flamme. Ces chaudières et conduits devront, de plus, être, suivant les cas, renforcés par des armatures suffisantes.

Art. 19. Après qu'il aura été constaté que les parois des chaudières en tôle ou en cuivre laminé ont les épaisseurs voulues, et après que les chaudières, les tubes bouilleurs, les réservoirs de vapeur, les cylindres en fonte et les enveloppes en fonte de ces cylindres auront été éprouvés, il y sera appliqué des timbres indiquant, en nombre d'atmosphères, le degré de tension intérieure que la vapeur ne devra pas dépasser. Ces timbres seront placés de manière à être toujours apparents, après la mise en place des chaudières et cylindres.

Art. 20. Les chaudières qui auront les faces planes seront dispensées de l'épreuve, mais sous la condition que la force élastique ou la tension de la vapeur ne devra pas s'élever, dans l'intérieur de ces chaudières, à plus *d'une atmosphère et demie*.

ART. 21. L'épreuve sera recommencée sur l'établissement dans lequel les machines ou chaudières doivent être employées, 1° si le propriétaire de l'établissement la réclame ; 2° s'il y a eu, pendant le transport ou lors de la mise en place, des avaries notables ; 3° si des modifications ou réparations quelconques ont été faites depuis l'épreuve opérée à la fabrique.

SECTION III.

DES APPAREILS DE SURETÉ DONT LES CHAUDIÈRES A VAPEUR DOIVENT ÊTRE MUNIES.

§ 1er. — DES SOUPAPES DE SURETÉ.

ART. 22. Il sera adapté à la partie supérieure de chaque chaudière deux soupapes de sûreté, une vers chaque extrémité de la chaudière.

Le diamètre des orifices de ces soupapes sera réglé d'après la surface de chauffe de la chaudière et la tension de la vapeur dans son intérieur, conformément à la table n° 2 annexée à la présente ordonnance.

ART. 23. Chaque soupape sera chargée d'un poids unique, agissant soit directement, soit par l'intermédiaire d'un levier.

Chaque poids recevra l'empreinte d'un poinçon. Dans le cas où il serait fait usage de leviers, ils devront être également poinçonnés. La quotité des poids et la longueur des leviers seront fixées par l'arrêté d'autorisation mentionné à l'article 10.

ART 24. La charge *maximum* de chaque soupape de sûreté sera déterminée en multipliant 1.^{k}033 par le nombre d'atmosphères mesurant la pression effective, et par le nombre de centimètres quarrés mesurant l'orifice de la soupape.

La largeur de la surface annulaire de recouvrement ne devra pas dépasser la trentième partie du diamètre de la surface circulaire exposée directement à la pression de la vapeur, et cette largeur, dans aucun cas, ne devra excéder deux millimètres.

§ 2. — DES MANOMÈTRES.

ART. 25. Toute chaudière à vapeur sera munie d'un manomètre à mercure, gradué en atmosphères et en fractions décimales d'atmosphère, de manière à faire connaître immédiatement la tension de la vapeur dans la chaudière.

Le tuyau qui amènera la vapeur au manomètre sera adapté

directement sur la chaudière, et non sur le tuyau de prise de vapeur ou sur tout autre tuyau dans lequel la vapeur serait en mouvement.

Le manomètre sera placé en vue du chauffeur.

ART. 26. On fera usage du manomètre à air libre, c'est-à-dire ouvert à sa partie supérieure, toutes les fois que la pression effective de la vapeur ne dépassera pas quatre atmosphères.

On emploiera toujours le manomètre à air libre, quelle que soit la pression effective de la vapeur, pour les chaudières mentionnées à l'article 43.

ART. 27. On tracera sur l'échelle de chaque manomètre, d'une manière apparente, une ligne qui répondra au numéro de cette échelle que le mercure ne devra pas dépasser.

§ 3. — DE L'ALIMENTATION ET DES INDICATEURS DU NIVEAU DE L'EAU DANS LES CHAUDIÈRES.

ART. 28. Toute chaudière sera munie d'une pompe d'alimentation, bien construite et en bon état d'entretien, ou de tout autre appareil alimentaire d'un effet certain.

ART. 29. Le niveau que l'eau doit avoir habituellement dans chaque chaudière sera indiqué, à l'extérieur, par une ligne tracée d'une manière très-apparente sur le corps de la chaudière ou sur le parement du fourneau.

Cette ligne sera d'un décimètre au moins au-dessus de la partie la plus élevée des carnaux, tubes ou conduits de la flamme et de la fumée dans le fourneau.

ART. 30. Chaque chaudière sera pourvue d'un *flotteur d'alarme*, c'est-à-dire qui détermine l'ouverture d'une issue par laquelle la vapeur s'échappe de la chaudière, avec un bruit suffisant pour avertir, toutes les fois que le niveau de l'eau dans la chaudière vient à s'abaisser de cinq centimètres au-dessous de la ligne d'eau dont il est fait mention à l'article 29.

ART. 31. La chaudière sera, en outre, munie de l'un des trois appareils suivants : 1° un flotteur ordinaire d'une mobilité suffisante; 2° un tube indicateur en verre; 3° des robinets indicateurs convenablement placés à des niveaux différents. Ces appareils indicateurs seront, dans tous les cas, disposés de manière à être en vue du chauffeur.

§ 4. — DES CHAUDIÈRES MULTIPLES.

ART. 32. Si plusieurs chaudières sont destinées à fonction-

ner ensemble, elles devront être disposées de manière à pouvoir, au besoin, être rendues indépendantes les unes des autres.

En conséquence, chaque chaudière sera alimentée séparément, et devra être munie de tous les appareils de sûreté prescrits par la présente ordonnance.

SECTION IV.

DE L'EMPLACEMENT DES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

Art. 33. Les conditions à remplir pour l'emplacement des chaudières à vapeur dépendent de la capacité de ces chaudières, y compris les tubes bouilleurs, et de la tension de la vapeur.

A cet effet, les chaudières sont réparties en quatre catégories.

On exprimera en mètres cubes la capacité de la chaudière avec ses tubes bouilleurs, et en atmosphères la tension de la vapeur, et on multipliera les deux nombres l'un par l'autre.

Les chaudières seront dans la première catégorie quand ce produit sera plus grand que 15;

Dans la deuxième, si ce même produit surpasse 7 et n'excède pas 15;

Dans la troisième, s'il est supérieur à 3 et s'il n'excède pas 7;

Dans la quatrième catégorie, s'il n'excède pas 3.

Si plusieurs chaudières doivent fonctionner ensemble dans un même emplacement, et s'il existe entre elles une communication quelconque, directe ou indirecte, on prendra, pour former le produit comme il vient d'être dit, la somme des capacités de ces chaudières, y compris celle de leurs tubes bouilleurs.

Art. 34. Les chaudières à vapeur comprises dans la première catégorie devront être établies en dehors de toute maison d'habitation et de tout atelier.

Art. 35. Néanmoins, pour laisser la faculté d'employer au chauffage des chaudières une chaleur qui, autrement, serait perdue, le préfet pourra autoriser l'établissement des chaudières de la première catégorie dans l'intérieur d'un atelier qui ne fera pas partie d'une maison d'habitation. L'autorisation sera portée à la connaissance de notre ministre des travaux publics.

Art. 36. Toutes les fois qu'il y aura moins de 10 mètres de distance entre une chaudière de la première catégorie et les maisons d'habitation ou la voie publique, il sera construit, en

bonne et solide maçonnerie, un mur de défense de 1 mètre d'épaisseur. Les autres dimensions seront déterminées comme il est dit à l'article 41.

Ce mur de défense sera, dans tous les cas, distinct du massif de maçonnerie des fourneaux, et en sera séparé par un espace libre de 50 centimètres de largeur au moins. Il devra également être séparé des murs mitoyens avec les maisons voisines.

Si la chaudière est enfoncée dans le sol, et établie de manière que sa partie supérieure soit à 1 mètre au moins en contre-bas du sol, le mur de défense ne sera exigible que lorsqu'elle se trouvera à moins de 5 mètres des maisons habitées ou de la voie publique.

Art. 37. Lorsqu'une chaudière de la première catégorie sera établie dans un local fermé, ce local ne sera point voûté, mais il devra être couvert d'une toiture légère, qui n'aura aucune liaison avec les toits des ateliers ou autres bâtiments contigus, et reposera sur une charpente particulière.

Art. 38. Les chaudières à vapeur comprises dans la deuxième catégorie pourront être placées dans l'intérieur d'un atelier, si toutefois cet atelier ne fait pas partie d'une maison d'habitation ou d'une fabrique à plusieurs étages.

Art. 39. Si les chaudières de cette catégorie sont à moins de 5 mètres de distance soit des maisons d'habitation, soit de la voie publique, il sera construit de ce côté un mur de défense tel qu'il est prescrit à l'article 36.

Art. 40. A l'égard des terrains contigus non bâtis appartenant à des tiers, si, après l'autorisation donnée par le préfet pour l'établissement de chaudières de première ou de seconde catégorie, les propriétaires de ces terrains font bâtir dans les distances énoncées aux articles 36 et 39, ou si ces terrains viennent à être consacrés à la voie publique, la construction de murs de défense, tels qu'ils sont prescrits ci-dessus, pourra, sur la demande des propriétaires desdits terrains, être imposée au propriétaire de la chaudière, par arrêté du préfet, sauf recours devant notre ministre des travaux publics.

Art. 41. L'autorisation donnée par le préfet, pour les chaudières de la première et de la deuxième catégorie, indiquera l'emplacement de la chaudière et la distance à laquelle cette chaudière devra être placée, par rapport aux habitations appartenant à des tiers et à la voie publique, et fixera, s'il y a lieu, la direction de l'axe de la chaudière.

Cette autorisation déterminera la situation et les dimensions,

en longueur et en hauteur, du mur de défense de 1 mètre, lorsqu'il sera nécessaire d'établir ce mur, en exécution des articles ci-dessus.

Dans la fixation de ces dimensions, on aura égard à la capacité de la chaudière, au degré de tension de la vapeur, et à toutes les autres circonstances qui pourront rendre l'établissement de la chaudière plus ou moins dangereux ou incommode.

Art. 42. Les chaudières de la troisième catégorie pourront aussi être placées dans l'intérieur d'un atelier qui ne fera pas partie d'une maison d'habitation, mais sans qu'il y ait lieu d'exiger le mur de défense.

Art. 43. Les chaudières de la quatrième catégorie pourront être placées dans l'intérieur d'un atelier quelconque, lors même que cet atelier fera partie d'une maison d'habitation.

Dans ce cas, les chaudières seront munies d'un manomètre à air libre, ainsi qu'il est dit à l'article 26.

Art. 44. Les fourneaux des chaudières à vapeur comprises dans la troisième et dans la quatrième catégorie seront entièrement séparés par un espace vide de 50 centimètres au moins des maisons d'habitation appartenant à des tiers.

Art. 45. Lorsque les chaudières établies dans l'intérieur d'un atelier ou d'une maison d'habitation seront couvertes, sur le dôme et sur les flancs, d'une enveloppe destinée à prévenir les déperditions de chaleur, cette enveloppe sera construite en matériaux légers; si elle est en briques, son épaisseur ne dépassera pas 1 décimètre.

TITRE III.

DISPOSITIONS RELATIVES A L'ÉTABLISSEMENT DES MACHINES A VAPEUR EMPLOYÉES DANS L'INTÉRIEUR DES MINES.

Art. 46. Les machines à vapeur placées à demeure dans l'intérieur des mines seront pourvues des appareils de sûreté prescrits par la présente ordonnance pour les machines fixes, et devront avoir subi les mêmes épreuves. Elles ne pourront être établies qu'en vertu d'autorisations du préfet délivrées sur le rapport des ingénieurs des mines.

Ces autorisations détermineront les conditions relatives à l'emplacement, à la disposition et au service habituel des machines.

TITRE IV.

DISPOSITIONS RELATIVES A L'EMPLOI DES MACHINES A VAPEUR LOCOMOBILES ET LOCOMOTIVES.

SECTION PREMIÈRE.

DES MACHINES LOCOMOBILES.

Art. 47. Sont considérées comme *locomobiles*, les machines à vapeur qui, pouvant être transportées facilement d'un lieu dans un autre, n'exigent aucune construction pour fonctionner à chaque station.

Art. 48. Les chaudières et autres pièces de ces machines seront soumises aux épreuves et aux conditions de sûreté prescrites aux sections II et III du titre II de la présente ordonnance, sauf les exceptions suivantes pour celles de ces chaudières qui sont construites suivant un système tubulaire.

Lesdites chaudières pourront être éprouvées sous une pression *double* seulement de la pression effective.

On pourra, quelle que soit la tension de la vapeur dans ces chaudières, remplacer le manomètre à air libre par un manomètre à air comprimé, ou même par un thermomanomètre, c'est-à-dire, par un thermomètre gradué en atmosphères et parties décimales d'atmosphère : les indications de ces instruments devront être facilement lisibles et placées en vue du chauffeur.

On pourra se dispenser d'adapter auxdites chaudières un flotteur d'alarme, et il suffira qu'elles soient munies d'un tube indicateur en verre convenablement placé.

Art. 49. Indépendamment des timbres relatifs aux conditions de sûreté, toute locomobile recevra une plaque portant le nom du propriétaire.

Art. 50. Aucune locomobile ne pourra fonctionner à moins de 100 mètres de distance de tout bâtiment, sans une autorisation spéciale donnée par le maire de la commune. En cas de refus, la partie intéressée pourra se pourvoir devant le préfet.

Art. 51. Si l'emploi d'une machine locomobile présente des dangers, soit parce qu'il n'aurait point été satisfait aux conditions de sûreté ci-dessus prescrites, soit parce que la machine n'aurait pas été entretenue en bon état de service, le préfet, sur le rapport de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, pourra suspendre ou même interdire l'usage de cette machine.

SECTION II.

DES MACHINES LOCOMOTIVES.

Art. 52. Les machines à vapeur *locomotives* sont celles qui, en se déplaçant par leur propre force, servent au transport des voyageurs, des marchandises ou des matériaux.

Art. 53. Les dispositions de l'article 48 sont applicables aux chaudières et autres pièces de ces machines, sauf l'exception énoncée en l'article ci-après.

Art. 54. Les soupapes de sûreté des machines locomotives pourront être chargées au moyen de ressorts disposés de manière à faire connaître, en kilogrammes et en fractions décimales de kilogramme, la pression qu'ils exerceront sur les soupapes.

Art. 55. Aucune machine locomotive ne pourra être mise en service sans un *permis de circulation* délivré par le préfet du département où se trouvera le point de départ de la locomotive.

Art. 56. La demande du permis contiendra les indications comprises sous les numéros 1 et 3 de l'article 5 de la présente ordonnance, et fera connaître, de plus, le nom donné à la machine locomotive et le service auquel elle sera destinée.

Le nom de la locomotive sera gravé sur une plaque fixée à la chaudière.

Art. 57. Le préfet, après avoir pris l'avis de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, délivrera, s'il y a lieu, le permis de circulation.

Art. 58. Dans ce permis seront énoncés :

1° Le nom de la locomotive et le service auquel elle sera destinée;

2° La pression *maximum* (en nombre d'atmosphères) de la vapeur dans la chaudière, et les numéros des timbres dont la chaudière et les cylindres auront été frappés;

3° Le diamètre des soupapes de sûreté;

4° La capacité de la chaudière;

5° Le diamètre des cylindres et la course des pistons;

6° Enfin, le nom du fabricant et l'année de la construction.

Art. 59. Si une machine locomotive ne satisfait pas aux conditions de sûreté ci-dessus prescrites, ou si elle n'est pas entretenue en bon état de service, le préfet, sur le rapport de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur

des ponts et chaussées, pourra en suspendre ou même en interdire l'usage.

Art. 60. Les conditions auxquelles sera assujettie la circulation des locomotives et des convois, en tout ce qui peut concerner la sûreté publique, seront déterminées par arrêtés du préfet du département où sera situé le lieu du départ, après avoir entendu les entrepreneurs et en ayant égard tant aux cahiers des charges des entreprises, qu'aux dispositions des règlements d'administration publique concernant les chemins de fer.

TITRE V.

DE LA SURVEILLANCE ADMINISTRATIVE DES MACHINES ET CHAUDIÈRES A VAPEUR.

Art. 61. Les ingénieurs des mines et, à leur défaut, les ingénieurs des ponts et chaussées sont chargés, sous l'autorité des préfets, de la surveillance des machines et des chaudières à vapeur.

Art. 62. Ces ingénieurs donnent leur avis sur les demandes en autorisation d'établir des machines ou des chaudières à vapeur, et sur les demandes de permis de circulation concernant les machines locomotives; ils dirigent les épreuves des chaudières et des autres pièces contenant la vapeur; ils font appliquer les timbres constatant les résultats de ces épreuves, et poinçonner les poids et les leviers des soupapes de sûreté.

Art. 63. Les mêmes ingénieurs s'assurent au moins une fois par an, et plus souvent, lorsqu'ils en reçoivent l'ordre du préfet, que toutes les conditions de sûreté prescrites sont exactement observées.

Ils visitent les machines et les chaudières à vapeur; ils en constatent l'état, et ils provoquent la réparation et même la réforme des chaudières et des autres pièces que le long usage ou une détérioration accidentelle leur ferait regarder comme dangereuses.

Ils proposent également de nouvelles épreuves, lorsqu'ils les jugent indispensables pour s'assurer que les chaudières et les autres pièces conservent une force de résistance suffisante, soit après un long usage, soit lorsqu'il y aura été fait des changements ou réparations notables.

Art. 64. Les mesures indiquées en l'article précédent sont ordonnées, s'il y a lieu, par le préfet, après avoir entendu les propriétaires, lesquels pourront, d'ailleurs, réclamer de nouvelles épreuves lorsqu'ils les jugeront nécessaires.

Art. 65. Lorsque, par suite de demandes en autorisation

d'établir des machines ou des appareils à vapeur, les ingénieurs des mines ou les ingénieurs des ponts et chaussées auront fait, par ordre du préfet, des actes de leur ministère de la nature de ceux qui donnent droit aux allocations établies par l'article 89 du décret du 18 novembre 1810, et par l'article 75 du décret du 7 fructidor an XII, ces allocations seront fixées et recouvrées dans les formes déterminées par lesdits décrets.

Art. 66. Les autorités chargées de la police locale exerceront une surveillance habituelle sur les établissements pourvus de machines ou de chaudières à vapeur.

TITRE VI.

DISPOSITIONS GÉNÉRALES.

Art. 67. Si, à raison du mode particulier de construction de certaines machines ou chaudières à vapeur, l'application, à ces machines ou chaudières, d'une partie des mesures de sûreté prescrites par la présente ordonnance se trouvait inutile, le préfet, sur le rapport des ingénieurs, pourra autoriser l'établissement de ces machines et chaudières, en les assujettissant à des conditions spéciales.

Si, au contraire, une chaudière ou machine paraît présenter des dangers d'une nature particulière, et s'il est possible de les prévenir par des mesures que la présente ordonnance ne rend point obligatoires, le préfet, sur le rapport des ingénieurs, pourra accorder l'autorisation demandée, sous les conditions qui seront reconnues nécessaires.

Dans l'un et l'autre cas, les autorisations données par le préfet seront soumises à l'approbation de notre ministre des travaux publics.

Art. 68. Lorsqu'une chaudière à vapeur sera alimentée par des eaux qui auraient la propriété d'attaquer d'une manière notable le métal de cette chaudière, la tension intérieure de la vapeur ne devra pas dépasser une atmosphère et demie, et la charge des soupapes sera réglée en conséquence. Néanmoins, l'usage des chaudières contenant la vapeur sous une tension plus élevée sera autorisé, lorsque la propriété corrosive des eaux d'alimentation sera détruite soit par une distillation préalable, soit par l'addition de substances neutralisantes, ou par tout autre moyen reconnu efficace.

Il est accordé un délai d'un an, à dater de la présente ordonnance, aux propriétaires des machines à vapeur alimentées par des eaux corrosives, pour se conformer aux prescrip-

sitions du présent article. Si, dans ce délai, ils ne s'y sont point conformés, l'usage de leurs appareils sera interdit par le préfet.

Art. 69. Les propriétaires et chefs d'établissements veilleront,

1° A ce que les machines et chaudières à vapeur et tout ce qui en dépend soient entretenus constamment en bon état de service;

2° A ce qu'il y ait toujours, près des machines et chaudières, des manomètres de rechange, ainsi que des tubes indicateurs de rechange, lorsque ces tubes seront au nombre des appareils employés pour indiquer le niveau de l'eau dans les chaudières;

3° A ce que lesdites machines et chaudières soient chauffées, manœuvrées et surveillées suivant les règles de l'art.

Conformément aux dispositions de l'article 1384 du Code civil, ils seront responsables des accidents et dommages résultant de la négligence ou de l'incapacité de leurs agents.

Art. 70. Il est défendu de faire fonctionner les machines et les chaudières à vapeur à une pression supérieure au degré déterminé dans les actes d'autorisation, et auquel correspondront les timbres dont ces machines et chaudières seront frappées.

Art. 71. En cas de changements ou de réparations notables qui seraient faits aux chaudières ou aux autres pièces passibles des épreuves, le propriétaire devra en donner avis au préfet, qui ordonnera, s'il y a lieu, de nouvelles épreuves, ainsi qu'il est dit aux articles 63 et 64.

Art. 72. Dans tous les cas d'épreuves, les appareils et la main-d'œuvre seront fournis par les propriétaires des machines et chaudières.

Art. 73. Les propriétaires de machines ou de chaudières à vapeur autorisées seront tenus d'adapter auxdites machines et chaudières les appareils de sûreté qui pourraient être découverts par la suite, et qui seraient prescrits par des règlements d'administration publique.

Art. 74. En cas de contravention aux dispositions de la présente ordonnance, les permissionnaires pourront encourir l'interdiction de leurs machines ou chaudières, sans préjudice des peines, dommages et intérêts qui seraient prononcés par les tribunaux. Cette interdiction sera prononcée par arrêtés des préfets, sauf recours devant notre ministre des travaux publics. Ce recours ne sera pas suspensif.

Art. 75. En cas d'accident, l'autorité chargée de la police locale se transportera, sans délai, sur les lieux, et le procès-verbal de sa visite sera transmis au préfet, et, s'il y a lieu, au procureur du roi.

L'ingénieur des mines, ou, à son défaut, l'ingénieur des ponts et chaussées se rendra aussi sur les lieux immédiatement, pour visiter les appareils à vapeur, en constater l'état et rechercher la cause de l'accident. Il adressera sur le tout un rapport au préfet.

En cas d'explosion, les propriétaires d'appareils à vapeur ou leurs représentants ne devront ni réparer les constructions, ni déplacer ou dénaturer les fragments de la chaudière ou machine rompue, avant la visite et la clôture du procès-verbal de l'ingénieur.

Art. 76. Les propriétaires d'établissements aujourd'hui autorisés se conformeront, dans le délai d'un an à dater de la publication de la présente ordonnance, aux prescriptions de la section III du titre II, articles 22 à 32 inclusivement.

Quant aux dispositions relatives à l'emplacement des chaudières énoncées dans la section IV du même titre, articles 33 à 45 inclusivement, les propriétaires des établissements existants qui auront accompli toutes les obligations prescrites par les ordonnances des 29 octobre 1823, 7 mai 1828, 23 septembre 1829 et 25 mars 1830, sont provisoirement dispensés de s'y conformer; néanmoins, quand ces établissements seront une cause de danger, le préfet, sur le rapport de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, et après avoir entendu le propriétaire de l'établissement, pourra prescrire la mise à exécution de tout ou partie des mesures portées en la présente ordonnance, dans un délai dont le terme sera fixé suivant l'exigence des cas.

Art. 77. Il sera publié, par notre ministre secrétaire d'État au département des travaux publics, une nouvelle instruction sur les mesures de précaution habituelles à observer dans l'emploi des machines et des chaudières à vapeur.

Cette instruction sera affichée à demeure dans l'enceinte des ateliers.

Art. 78. L'établissement et la surveillance des machines et appareils à vapeur qui dépendent des services spéciaux de l'Etat sont régis par des dispositions particulières, sauf les conditions qui peuvent intéresser les tiers, relativement à la sûreté et à l'incommodité, et en se conformant aux prescriptions du décret du 15 octobre 1810.

Art. 79. Les attributions données aux préfets des départements par la présente ordonnance seront exercées par le préfet de police dans toute l'étendue du département de la Seine, et dans les communes de Saint-Cloud, Meudon et Sèvres, du département de Seine-et-Oise.

Art. 80. Les ordonnances royales des 29 octobre 1823, 7 mai 1828, 23 septembre 1829, 25 mars 1830 et 22 juillet 1839, concernant les machines et chaudières à vapeur, sont rapportées.

Art. 81. Notre ministre secrétaire d'Etat au département des travaux publics est chargé de l'exécution de la présente ordonnance, qui sera insérée au Bulletin des lois.

Fait au Palais des Tuileries, le 22 mai 1843.

Signé LOUIS-PHILIPPE.

Par le Roi :

Le Ministre Secrétaire d'Etat au département des travaux publics,

Signé J.-B. Teste.

A cette ordonnance sont jointes trois planches représentant :

La première, une soupape de sûreté ;

La seconde, un manomètre à air libre ;

La troisième, un flotteur d'alarme.

Les figures de 1 à 11 (*Pl.* VII) représentent ces divers appareils auxquels nous avons cru devoir ajouter les suivants, dont les uns sont de simples additions, les autres des moyens considérés, à tort ou à raison, comme plus économiques pour arriver aux mêmes résultats, la forme des appareils n'ayant pas été imposée par l'administration.

Fig. 20 et 21 (*Pl.* XIX), robinet vérificateur du niveau de l'eau, dans les chaudières, employé en Angleterre soit sur les bateaux, soit sur les chaudières dont la tête fait saillie en avant du fourneau.

Trois robinets de ce genre sont superposés à 5 centimètres (2 pouces) de distance l'un de l'autre, celui du milieu correspondant avec le niveau de l'eau dans la chaudière. Il suffit d'appuyer fortement sur le chapeau A de la soupape, avec le pouce, ou avec l'extrémité de la pelle à charbon, pour faire jaillir par l'orifice B soit de l'eau, soit de la vapeur, soit un mélange d'eau et de vapeur, suivant le ni-

veau auquel l'eau se trouve dans la chaudière. Chacun de ces robinets en cuivre coûte 5 francs.

Fig. 22 et 23 (*Pl.* XIX), robinet purgeur pour cylindres de locomotives.

Fig. 24, robinet à graisse pour cylindre de machine fixe ou de bateau à haute pression.

Fig. 12 (*Pl.* VII), pompe d'alimentation sans clapets, par *C. E. Jullien* et *Leloup*.

Cette pompe, dont le principe est l'inverse de celui des machines à vapeur oscillantes, ne peut pas ne pas fonctionner, quelque trouble que soit l'eau qu'elle est chargée d'introduire dans la chaudière. Il est, par exemple, très-important de la faire toujours tourner dans le même sens, sans quoi elle produirait l'effet opposé à celui que l'on veut produire; en effet, il suffit d'examiner le dessin pour se convaincre que, quand on tourne dans un sens, l'aspiration a lieu d'un côté de l'axe creux et le refoulement de l'autre; tandis que, quand on tourne dans l'autre sens, le contraire a lieu.

Fig. 13, 14, 15 (*Pl.* VII), flotteurs d'alarme de M. Bourdon, mécanicien à Paris.

Ce par quoi les flotteurs d'alarme de M. Bourdon diffèrent principalement de celui indiqué par l'administration, c'est la manière dont on les fixe sur la chaudière.

En effet, pour poser les flotteurs de M. Bourdon, il suffit de faire un trou unique au lieu de cinq au moins que nécessite l'autre, en supposant que l'on ne met que trois boulons pour le sifflet.

Fig. 16, 17, 18, flotteur d'alarme, par *C. E. Jullien*. Ce flotteur diffère des précédents, en ce que tout l'attirail du contrepoids est situé hors de la chaudière, ce qui permet de vérifier, à chaque instant, si l'appareil fonctionne régulièrement. Le seul inconvénient de cet appareil, c'est d'exiger un plus grand diamètre que les autres pour la soupape; mais on remédie facilement à cet inconvénient en augmentant les dimensions de la pierre flottante.

ARTICLE II.

DISTILLATION.

La distillation a pour but de séparer une ou plusieurs matières volatiles d'une ou plusieurs matières fixes. C'est une vaporisation, à une pression au plus égale à la pression atmosphérique.

Elle se divise en deux opérations distinctes:

1° Vaporisation de la substance volatile;

2° Condensation des vapeurs de cette substance.

Les calculs et dispositions d'appareils relatifs à la vaporisation sont les mêmes que dans l'article précédent; il ne nous reste donc à nous occuper ici que de la condensation des vapeurs.

Il y a deux modes de condensation des vapeurs :

1° En mélangeant la substance condensante avec la substance à condenser;

2° En maintenant ces deux substances séparées, celle à condenser étant renfermée dans un vase dont les parois sont très-conductrices de la chaleur.

Suivant la température et la pression à laquelle s'effectue la condensation, la quantité de matière condensante et les appareils employés varient.

L'eau est la substance spécialement employée à la condensation des vapeurs.

Quel que soit le système employé pour condenser la vapeur, la dépense de chaleur pour évaporer une même substance est constante.

Quant à la quantité d'eau froide à injecter pour opérer la condensation, elle varie suivant la température à laquelle on condense, la capacité calorifique de la matière à condenser, et le mode d'injection de l'eau.

§ 1er. — CONDENSATION EN SERPENTINS.

Dans le cas où les vapeurs à condenser circulent dans des *serpentins*, ce qui a lieu lorsqu'on ne veut pas mêler à l'eau condensante la substance condensée, on distingue deux modes d'injection de l'eau froide :

1° Condensation par contact de la surface du serpentin avec l'eau, dans un vase rempli de ce liquide;

2° Condensation par aspersion sur la surface du serpentin, au milieu d'un courant d'air.

1° *Condensation par simple contact.*

Soient :

P le poids de la matière à condenser dans un temps donné;

p le poids de la quantité d'eau nécessaire à la condensation de P;

t la température de l'eau froide;

θ la température à laquelle on condense ;

c la capacité calorifique de la vapeur à condenser, celle de la vapeur d'eau étant 650 pour 1 kilogramme;

c' la capacité calorifique de la substance condensée, celle de l'eau étant 1.

La quantité de chaleur contenue dans la vapeur à condenser est P c.

La quantité de chaleur que conserve la substance condensée, à la température θ, est P c' θ.

La quantité de chaleur à lui enlever est donc :

$$\mathrm{P}\,(c - c'\theta).$$

La quantité de chaleur que prend l'eau est représentée par :

$$p\,(\theta - t).$$

On a donc :

$$\mathrm{P}\,(c - c'\,\theta) = p\,(\theta - t)$$

d'où :

$$p = \mathrm{P}\,\frac{c - c'\,\theta}{\theta - t}$$

Si la substance distillée est hétérogène et contient des quantités connues de substances différentes, on a :

$$\mathrm{P}\,(c - c'\theta) + \mathrm{P}_1\,(c_1 - c'_1\,\theta) + \text{etc.} = p\,(\theta - t)$$

d'où : $$p = \frac{\mathrm{P}\,(c - c'\theta) + \mathrm{P}_1\,(c_1 - c'_1\,\theta) + \text{etc.}}{\theta - t}$$

Exemple : soit proposé de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour condenser à 20° un mélange d'eau et d'alcool contenant :

77 kil. alcool;
23 *id.* eau.

On a : $c = 78 \times 0.7 + 207.7 = 262$ (Despret)
$c' = 0.70$
$c_1 = 6.50$
$c'_1 = 1.00$
$t = 10^\circ.00$

$$p = \frac{77\,(262 - 0.7 \times 20) + 23\,(650 - 20)}{20 - 10}$$

$= 3370$ kilogrammes.

Surface de refroidissement. Les appareils à condensation sont

généralement en cuivre rouge, métal qui jouit non-seulement d'une malléabilité extrême, mais encore d'une faculté conductrice de la chaleur très-grande. On emploie pourtant aussi, dans certains cas, le plomb ou le platine lorsque le cuivre est susceptible de se combiner à la substance que l'on distille.

Pour déterminer la surface de cuivre nécessaire à la condensation d'une quantité donnée de vapeur d'une certaine substance, dans un temps donné, on serait tenté de faire usage des données de M. *Péclet*, relatives à la surface de chauffe, et de leur appliquer, comme nous avons déjà fait, la loi de Newton.

Mais il ne peut en être ainsi, parce que ces données supposent une surface métallique placée entre de l'eau et de l'air. Or, le refroidissement dans l'air est infiniment plus long que dans l'eau par suite des différences de facultés conductrices de la chaleur de ces deux substances; il faut donc avoir encore recours à l'expérience pour déterminer cette surface.

On a trouvé que un mètre quarré de serpentin en cuivre de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, en contact avec de l'eau dont la température varie entre 20 et 25 degrés, condensait par heure 107 kilogrammes de vapeur, tandis que la même surface en contact avec l'air à 15 degrés ne condense que 1.^{k}40 dans le même temps, au lieu de 2.^{k}00 que l'on trouve en appliquant la loi de Newton aux données de M. *Péclet* (*page* 218).

Prenant le résultat 107 kilogrammes, nous en déduisons :

La quantité de chaleur passant par heure et par mètre quarré de surface de cuivre de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, est, pour une différence de température égale à 77°5, en moyenne :

$$107\,(650 - 25) = 67000 \text{ unités de chaleur.}$$

Connaissant la quantité de chaleur que laisse passer la surface du serpentin par heure, ainsi que la quantité de chaleur que doit perdre par heure la substance à condenser, il est facile de déterminer la surface du serpentin.

2° *Condensation par évaporation.*

Si on fait circuler un serpentin dans l'intérieur d'un tube vertical, légèrement conique, avec ouvertures en haut et en bas, la chaleur que répand ce serpentin, rempli de vapeurs, dans l'intérieur du tube, échauffe l'air et y établit un courant semblable à celui qui a lieu dans les cheminées.

Si ensuite on fait tomber de l'eau en filets très-fins sur ce serpentin, cette eau s'échauffe aux dépens de la chaleur du

serpentin, puis, se trouvant en contact avec de l'air, sature ce dernier en quantité d'autant plus grande que sa température est plus élevée.

Or, toutes les fois que l'eau se convertit en vapeur, elle absorbe 650 unités de chaleur par kilogramme de vapeur produite.

Pour déterminer la quantité d'eau entraînée ainsi par l'air à l'état de vapeur, il suffit de consulter le tableau suivant :

Tableau du poids de la vapeur renfermée dans un mètre cube d'air saturé, à différentes températures, sous la pression atmosphérique de 0.m76 de mercure.

TEMPÉRATURE.	POIDS de la VAPEUR.	TEMPÉRATURE.	POIDS de la VAPEUR.
	grammes.		grammes.
0	5.200	55	88.740
5	7.200	60	105.840
10	9.500	65	127.200
15	12.830	70	141.960
20	16.780	75	173.740
25	22.010	80	199.240
30	28.510	85	227.200
35	37.000	90	251.340
40	46.400	95	273.780
45	58.600	100	295.000
50	63.630		

Si la température de condensation est 20° par exemple, et celle d'ébullition de la substance distillée 120°, il est évident que la température du serpentin varie depuis le bas jusqu'en haut entre 20 et 120°, d'où résulte que l'air se sature de quantités variables d'eau dans les différents points de la hauteur de la cheminée de tirage. En admettant une température moyenne, on détermine approximativement la quantité d'eau emportée ainsi par l'air, connaissant le volume de ce dernier qui passe par la cheminée dans un temps donné, volume qui se calcule aussi approximativement.

Afin de déterminer le rapport qui existe entre les quantités d'eau dépensées par ce système et celles dépensées par le premier, proposons-nous le même exemple que précédemment, et nous aurons :

Température du mélange d'alcool et d'eau en ébullition, environ. . . . . 90°
Température de condensation. . . . . . . 20°
Température moyenne. . . . . 55°

A 55° un mètre cube d'air saturé contient 0.k08874 de vapeur d'eau.

Supposant qu'il ne se sature qu'à demi, chaque mètre cube ne prendra que 0.k04437, lesquels emporteront avec eux (650—55) 0.04437 = 26,45 unités de chaleur.

La quantité de chaleur à enlever par heure étant 33700 unités, il faut qu'il passe par heure dans la cheminée de tirage $\frac{33700}{26.45}$ = 1280 mètres cubes, emportant avec eux 1280 × 0.04437 = 56.k 8 de vapeur d'eau.

Il est probable qu'il y aurait plus d'eau employée, mais toujours est-il que théoriquement 56.k8 font le même effet que 3370 kil. dans le premier cas.

Ce procédé de condensation a été appliqué dans beaucoup de circonstances, notamment dans les raffineries de sucre. Il a tellement d'analogie avec l'évaporation des liquide et le séchage, que nous verrons plus loin, que nous croyons inutile de nous y arrêter plus longtemps.

§ 2. — CONDENSATION PAR MÉLANGE.

Dans le cas où la condensation a lieu sous une pression égale à la pression atmosphérique, la disposition des appareils ne présente rien de remarquable. On fait arriver la vapeur à condenser et l'eau froide dans un grand vase, ouvert inférieurement et plongé dans un autre, où un niveau donné ne peut être dépassé par l'eau de condensation.

Dans le cas où la condensation se fait sous une pression inférieure à celle de l'atmosphère, comme dans les machines à vapeur dites à condensation, la question se complique comme nous allons le voir.

Soit P un poids de vapeur d'eau à condenser dans un temps donné, à une température de θ° avec de l'eau à t°, on a,

d'après la formule de la page 262, pour trouver le poids p d'eau froide :

$$p = \frac{P\,(650 - \theta)}{\theta - t}$$

On obtient aussi la quantité d'eau qu'il faut injecter dans le *condenseur* pour liquéfier le poids P de vapeur.

Cette eau injectée, il n'est pas possible, comme précédemment, de la faire écouler par la partie inférieure du vase, sans quoi la pression atmosphérique réagirait sur l'intérieur de l'appareil; il faut avoir recours à une pompe qui enlève l'eau condensante et la vapeur condensée au fur et à mesure qu'elles tombent au fond de l'appareil. Il y aurait un moyen de n'être pas obligé d'avoir recours à une pompe : ce serait de terminer le condenseur inférieurement par un tube d'une hauteur au moins égale à la différence de pression, en eau, entre l'intérieur et l'extérieur de l'appareil.

Mais ce moyen est impraticable pour la raison suivante :

L'eau, injectée dans le condenseur, contient de l'air en dissolution. Cet air transporté subitement dans un milieu dont la température et la pression sont supérieures à celles auxquelles il était primitivement soumis, se dégage et opère dans le condenseur une pression sans cesse croissante, à mesure qu'il arrive de l'eau, et finit bientôt par faire équilibre à la pression extérieure.

Il faut donc, pour conserver la pression constante dans le condenseur, non-seulement retirer l'eau injectée, mais encore l'air qui s'y est introduit avec elle. Or, il n'y a qu'au moyen d'une pompe que l'on peut arriver à ce but, et la pompe employée à cet effet, dans les machines à vapeur, porte le nom de *pompe à air*.

Le problème à résoudre pour la condensation d'un poids P de vapeur, est celui-ci :

A quelle température est-il le plus convenable de condenser, pour avoir le moins de pression possible dans le condenseur, et le moindre travail possible à dépenser pour en retirer l'air introduit avec l'eau froide.

Pour résoudre ce problème, on sait qu'un volume d'eau à 10°, sous la pression 0.m76 de mercure, tient, en moyenne, en dissolution un vingtième d'air. Donc, pour chaque 20 litres d'eau, il y a un litre d'air introduit.

Les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions et

proportionnels aux températures, de sorte que pour avoir le volume de 1 litre d'air introduit dans le condenseur à la température θ et sous la pression h, il suffit de poser :

$$V = 1 \frac{0.76}{h} \times \frac{1 + a\,\theta}{1 + 10\,a}$$

Les valeurs de h et θ sont liées entre elles par la loi de *Dalton* sur les vapeurs produites à des températures et pressions inférieures à celles de l'atmosphère, de laquelle résulte le tableau suivant :

VALEURS DE θ.	Valeurs correspondantes de h en mercure.	VALEURS DE V.
0o	0.m00506	145.lit.00
10	0. 00948	80. 00
20	0. 01731	45. 60
30	0. 03064	26. 70
40	0. 05300	15. 90
50	0. 08874	9. 80
60	0. 14466	6. 25
70	0. 22907	4. 00
80	0. 35208	2. 70
90	0. 52528	1. 86
100	0. 76000	1. 33

Ainsi, en condensant à 0°, pour chaque litre d'air introduit dans le condenseur, il y a 145 litres à retirer au moyen de la pompe à air ; tandis que, en condensant à 100°, il n'y a que 1 litre 33 à retirer. Mais, en revanche, la pression dans le condenseur est, dans le premier cas, 0,m00506, tandis que dans le second cas, elle est 0.76000, c'est-à-dire 150 fois aussi grande.

De plus, si nous résolvons la formule

$$p = \frac{P\,(650 - \theta)}{\theta - t}$$

pour toutes les températures envisagées ci-dessus, nous obtenons, en faisant :

$P = 1$ kil. et $t = 10°$,

Températures de condensation.	Quantité d'eau à injecter pour condenser 1 kil. de vapeur.
θ = 0°	»
10	∞ kil.
20	63.00
30	31.00
40	20.33
50	15.00
60	11.80
70	9.66
80	8.14
90	7.00
100	6.11

Ainsi, plus la température de condensation est basse, plus la quantité d'eau à injecter dans le condenseur est considérable ; plus aussi la quantité d'air à en retirer est grande ; plus, par conséquent, le travail à dépenser par la pompe est grand ; mais, aussi, plus la pression dans le condenseur est petite, et réciproquement.

Si donc, on veut satisfaire à la fois aux deux conditions de pression *minima* dans le condenseur, et travail *minimum* dans la pompe à air, il faut adopter une température moyenne.

Dans les machines à vapeur, on est dans l'usage de condenser entre 34 et 42°, en moyenne 38°, correspondant à une pression, dans le condenseur, de $0^m,0047579$, ou $^1/_{16}$ d'atmosphère ; nous verrons plus tard si c'est réellement le point convenable.

ARTICLE III.

ÉVAPORATION.

Nous donnons ce nom à l'opération qui a pour but d'enlever de l'eau à des substances solides ou liquides, au moyen d'un courant d'air se saturant de cette eau.

§ 1er, ÉVAPORATION PROPREMENT DITE.

La première question que soulève l'évaporation est la suivante :

A quelle température est-il le plus économique d'opérer l'évaporation ?

Pour résoudre cette question, nous remarquons que :

1° Plus l'air est chaud, plus la quantité de vapeur nécessaire à sa saturation est grande; donc, moins il en faut employer à l'évaporation d'une quantité donnée d'eau.

2° La quantité de chaleur emportée par l'air après la saturation étant perdue, à quantité égale d'air employé, il y a d'autant moins de chaleur perdue qu'il a été moins chauffé.

D'après ce, soit P un poids d'eau à évaporer.

Soit p le poids d'air nécessaire à cette évaporation, à la température t de sortie hors de l'appareil où se fait l'évaporation. La chaleur perdue est $\frac{1}{4}\, v\, t$.

Soit P = 1 kil.

D'après le tableau (page 264), on a :

		m.c.		Unités de chaleur.
Pour t =	0° . p =	192.00	et $\frac{1}{4}\, p\, t$ =	0.00
	10° . . .	105.05	. . .	263.75
	20° . . .	60.00	. . .	400.00
	25° . . .	45.40	. . .	284.00
	30° . . .	35.00	. . .	262.50
	40° . . .	21.60	. . .	216.00
	50° . . .	15.80	. . .	198.00
	60° . . .	9.55	. . .	143.00
	70° . . .	7.05	. . .	123.00
	80° . . .	5.00	. . .	100.00
	90° . . .	4.00	. . .	90.00
	100° . . .	3.40	. . .	85.00

Ainsi, il y a économie à évaporer à la plus haute température possible. Lors donc que l'on a à évaporer de l'eau, il faut connaître quelle peut être la température *maxima* de l'air sortant du *calorifère*.

Soit, par exemple, proposé d'évaporer un poids P d'eau, la température de l'air chaud ne devant pas dépasser t^{o}.

Soit t' la température de l'air sortant de l'appareil saturé d'eau, et p le poids d'air nécessaire à l'évaporation de P.

On a la première équation :

$$P \times 650 = \frac{1}{4}\, p\, (t - t'). \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

La quantité de chaleur nécessaire pour évaporer le poids P d'eau est égale à la quantité de chaleur abandonnée par l'air chaud dans l'appareil évaporatoire.

L'air sortant saturé de l'appareil, on obtient le poids de 1 mètre cube à la température t', en remarquant que :

1° Un mètre cube d'air sec, pesant 1.k3 à 0°, sous la pression 0.76, à t'° sous la même pression, il pèsera :

$$1.^{k}3 \times \frac{1}{1 + 0.00366\,t'}$$

2° Un mètre cube d'air sec pesant $1.3 \frac{1}{1 + 0{,}00366\,t'}$ sous la pression 0.m76, un mètre cube d'air saturé pesera, en représentant par h la tension de la vapeur, non compris le poids de cette dernière :

$$1.3 \frac{1}{1 + 0.00366\,t'} \times \frac{0.76}{0.76 + h}$$

h est donné par le tableau suivant :

Tableau des tensions de la vapeur d'eau pour différentes températures.

Degrés du thermomètre.	Tension en millimètres de mercure.	Degrés du thermomètre.	Tension en millimètres de mercure.	Degrés du thermomètre.	Tension en millimètres de mercure.
	m.m.		m.m.		m.m.
0°	5.393	40	52.998	80	352.080
5	6.947	45	68.751	85	431.710
10	9 475	50	88.743	90	525.280
15	12.837	55	113.710	95	634.270
20	17.314	60	144.660	100	760.000
25	23.090	65	182.710	106.6	950.000
30	30.645	70	229.070	112.4	1140.000
35	40.404	75	283.070	117.1	1330,000

Si n est le nombre de mètres cubes d'air nécessaires pour évaporer P à la température t', on a :

$$p = n \times 1.3 \frac{1}{1 + 0.00366\,t'} \times \frac{0.76}{0.76 + h} \quad (2)$$

Enfin, si a est la quantité de vapeur en poids dont se charge un mètre cube d'air à t'°, on a :

$$P = n\,a \;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;. \quad (3)$$

Remplaçant, dans la première équation, les quantités P et p par leurs valeurs données par les équations (2) et (3), il vient :

$$n a \times 650 = \frac{1}{4} n \times 1.3 \frac{1}{1+0.00366\, t'} \times \frac{0.76}{0.76+h} (t-t')$$

Divisant de part et d'autre par n, et résolvant par rapport à t, il vient :

$$t = \frac{\left(650\, a \times 0.00366 + \frac{1}{4}\, 1.3 \times \frac{0.76}{0.76+h}\right) t' + 650\, a}{\frac{1}{4}\, 1.3 \frac{0.76}{0.76+h}} \quad (4)$$

Dans cette équation, t est une constante donnée *à priori*, et dépendant de la nature de la substance qu'il faut dessécher ; a et h sont deux variables dont les valeurs sont assujetties à la valeur de t'.

Il en résulte que, pour avoir t', il faut faire différentes hypothèses sur sa valeur, et les substituer dans l'équation (4) jusqu'à ce que l'on obtienne pour t une valeur égale à celle que l'on a déterminée comme ne devant pas être dépassée.

Nous voyons, par cette équation, que les valeurs de t ou t', à volonté, sont indépendantes de P, de p et de n, ce qui nous indique que, quelle que soit la quantité de matière à évaporer, les températures sont invariables, et que, du moment où on en connaît une, tout le reste est déterminé.

Exemple.

Soit donné $t = 217^\circ$, et supposons :

1° $t' = 45^\circ$

nous avons alors. . . . . . $a = 0.^k 0586$
$h = 0.^m 068751$

Nous en déduisons : $650\, a = 38.1$
$0.76 + h = 0.828751$

d'où résulte : $t = 194^\circ$, au lieu de 217°

2° $t' = 50^\circ$.

nous avons alors. . . . . . $a = 0.^k 06363$
$h = 0.^m 088143$

Nous en déduisons : $\dfrac{650\, a}{0.76+h} = \dfrac{41.45}{0.^{m}848743}$

et $t = 218^{o}.7$

Nous pouvons prendre $t' = 49$ degrés.

Effectuant les calculs indiqués dans la formule (4), nous obtenons :

$$t = \frac{\left(2.38\, a + \dfrac{0.247}{0.76+h}\right) t' + 650\, a}{\dfrac{0.247}{0.76+h}} \quad (5)$$

Veut-on savoir maintenant quelle est la quantité d'air nécessaire à l'évaporation de P, on a, d'après l'équation (3) :

$$P = n a \qquad \text{d'où} \qquad n = \frac{P}{a}$$

Substituant cette valeur de n dans l'équation (2), il vient :

$$p = \frac{P}{a}\, 1.3\, \frac{1}{1+0.00366\, t'} \times \frac{0.76}{0.76+h}$$

On peut aussi déduire cette valeur de p de l'équation (1), ce qui donne :

$$p = \frac{4\, P \times 650}{t - t'}$$

Ainsi, en appliquant ces formules au cas particulier de $t' = 50^{o}$, auquel cas $t = 218^{o}.7$; il vient, par l'une ou l'autre formule :

$$p = 15.4\, P.$$

Pour avoir la quantité de chaleur à dépenser, il suffit de remarquer qu'elle est égale à celle nécessaire pour évaporer le poids d'eau P, ou :

$$P \times 650$$

plus celle emportée par l'air saturé hors de l'appareil à la température t', c'est-à-dire :

$$\tfrac{1}{4}\, p t'.$$

En somme $\quad P \times 650 + \tfrac{1}{4}\, p t' = \tfrac{1}{4}\, p t$

comme on peut le déduire de l'équation (1).

Voici pour la théorie. Maintenant nous dirons :

En pratique, il n'est pas possible d'admettre pour a la valeur que donne la table (page 264), par la raison que 1 mètre cube d'air ne peut absorber cette quantité de vapeur qu'autant qu'il est parfaitement sec, et en contact avec excès de cette dernière.

Or, généralement, l'air contient en dissolution une plus ou moins grande quantité de vapeur ; de plus, il ne peut circuler assez dans les appareils évaporatoires pour se saturer complètement ; c'est pourquoi on est dans l'usage de ne prendre pour a que la moitié de la valeur donnée par la table, ce qui entraîne l'emploi d'un poids double d'air et une perte de chaleur égale à :

$$\frac{1}{4}\, p \times t'$$

§ 2. — CHAUFFAGE DE L'AIR.

Si t continue à être la température d'introduction de l'air chaud dans l'appareil évaporatoire, et p la quantité d'air nécessaire à l'évaporation du poids P d'eau, la quantité de chaleur à dépenser étant :

$$\frac{1}{4}\, p\, t$$

on obtient la quantité de houille à dépenser pour chauffer cet air, en divisant $\frac{1}{4}\, p\, t$ par la quantité de chaleur utilisable que donne 1 kilogramme de ce combustible. Connaissant la quantité de houille dépensée par heure, on détermine facilement la surface de la grille et la surface de chauffe, sachant que :

1° Pour chaque 10 kilogrammes de houille brûlés par heure, la surface de la grille doit être, en moyenne, de 0.mq 15.

2° Pour une différence de température de 158°, un mètre quarré de surface de tôle laisse passer par heure 612 unités de chaleur ; de plus, la différence entre la température moyenne de la fumée, dans les tuyaux de chauffage de l'air, et l'air qui circule autour, est environ 450°.

Il résulte de là que la quantité moyenne de chaleur qui passe, par heure et par mètre quarré de surface de tôle, dans un calorifère, est à très-peu près donnée par la proportion :

$$158 : 612 :: 450 : x.$$

d'où : $x = 1745$ unités de chaleur.

Un kilogramme de houille donnant environ 4000 unités de chaleur utilisable, on en conclut qu'il faut $\frac{4000}{1745} = 2.^{mq}3$ de surface de chauffe par kilogramme de houille brûlé par heure; nombre que l'on peut porter sans inconvénient à $2.^{mq}5$.

Des Calorifères.

Les calorifères sont de grandes chambres en maçonnerie au milieu desquelles est placé un foyer en briques ou en fonte, correspondant avec l'extérieur de la pièce, et surmonté d'un dôme en fonte, dans lequel vient s'embrancher un tuyau principal destiné à conduire la fumée dans la cheminée, après l'avoir fait circuler, d'une manière plus ou moins compliquée, dans la chambre à air chaud. L'air froid entre dans la chambre par des portes ménagées à la partie inférieure, et l'air chaud se dégage par des conduits partant de la partie supérieure.

La quantité de chaleur passant au travers des parois des tuyaux étant proportionnelle à la différence des températures, il est convenable, pour rendre cette différence des températures plus générale, de faire circuler l'air à chauffer en sens inverse de la fumée, de manière que l'air froid entre dans l'appareil en contact avec l'extrémité du tuyau du côté de la cheminée, et en sorte au moment où il arrive près du foyer.

Par ce moyen, il y a une différence des températures à peu près constante depuis le commencement jusqu'à la fin de la chauffe, tandis que, quand l'air arrive dans le sens opposé, la différence des températures est énorme près du foyer, mais diminue ensuite au point que l'air chauffé y est quelquefois plus chaud que celui qui circule dans les tuyaux en contact avec lui.

Quant à la détermination des sections des tuyaux d'écoulement de la fumée et de l'air chaud, nous renvoyons pour cela aux formules de la *page* 193, relatives aux cheminées.

Le chauffage de l'air n'est pas seulement employé à produire l'évaporation; il est aussi fort en usage aujourd'hui pour le chauffage et la ventilation des lieux publics, maisons particulières, serres chaudes, etc., toutes les fois que la température extérieure est au-dessous de la moyenne, c'est-à-dire 10°.

Dans le cas de ventilation de lieux publics dont on connaît

la capacité, en nombre d'individus qui peuvent y séjourner à la fois, on calcule le nombre de mètres cubes qui doivent être renouvelés par heure, en admettant qu'un homme consomme par la respiration 8 mètres cubes d'air pur par heure, à 15°.

Il est important, pour les appareils destinés à la ventilation, de bien tenir compte de la perte de chaleur qui a lieu par les murs et fenêtres de la pièce ventilée à l'air chaud; sans quoi, on ne parvient pas à chauffer suffisamment, ou, en cas contraire, on ne renouvelle pas assez l'air.

On admet, en général, que l'air destiné à la ventilation des lieux habités doit sortir du calorifère à la température de 40 degrés centigrades.

LIVRE IX.

CHIMIE INDUSTRIELLE.

INTRODUCTION.

Définition de la chimie.

La chimie est l'étude de l'action intime et réciproque de tous les corps les uns sur les autres.

Les corps naturels ou artificiels se partagent en corps *simples* et corps *composés*.

Corps simples.

Les corps *simples* sont ceux dont on ne peut jamais retirer qu'une seule substance, de quelque manière qu'on les traite. On compte aujourd'hui cinquante-cinq corps simples. Cependant, les corps qu'on nomme aujourd'hui *simples* peuvent bien n'être que des corps composés; ainsi, le cyanogène, qui est réellement un corps composé, agit à la manière des corps simples. De nouvelles découvertes peuvent donc nous apprendre, par la suite, que bien des corps que nous considérons aujourd'hui comme de simples éléments, peuvent n'être qu'une combinaison de corps simples.

Classification des corps simples.

Les corps simples et composés se présentent à nous sous trois états physiques tout-à-fait différents :

1° Les corps *solides ;*
2° Les corps *liquides ;*
3° Les *gaz* ou *fluides aériformes*.

Les corps solides sont les plus nombreux ; les liquides viennent ensuite, et les gaz permanents simples ou composés sont les moins nombreux. Leur nombre, jusqu'ici, est égal à trente-six. Tout porte à croire, cependant, que tous les corps qui ne pourraient pas se décomposer par la chaleur, le seraient par un froid très-intense, et pourraient se présenter ainsi sous les trois états.

Atomes ou molécules.

La matière n'est pas divisible à l'infini, et les dernières limites de la division des corps portent le nom d'*atomes* ou *molé-*

cules. Leur extrême petitesse ne permet pas de les déterminer, mais la chimie nous enseigne les moyens de connaître avec beaucoup d'exactitude le rapport de leurs poids. On considère la forme des atomes comme sphérique, et la combinaison de deux corps s'explique en la regardant comme la juxta-position des deux dernières molécules de la matière ; et c'est une force attractive qui les maintient dans cet état. L'expérience de la dilatation a prouvé que les molécules ne se touchent pas, et qu'elles sont séparées par des espaces vides de matière pondérable.

Cohésion. — Affinité.

Cette force qui retient les molécules d'un corps se nomme *attraction moléculaire*, et *cohésion* ou *affinité*, suivant la nature des atomes qu'elle sollicite. Elle diffère de la gravité, en ce qu'à une faible distance cette force cesse d'agir.

Si le corps est simple, les molécules étant de même nature, on les appelle *atomes intégrants* ou *molécules intégrantes*. S'il est composé, les atomes sont de deux espèces : 1° *atomes intégrants*, ou de même nature que le corps composé; 2° *atomes constituants*, ou *molécules constituantes*, ou atomes qui contiennent une molécule de chacun des corps composants.

La *cohésion* est la force attractive qui unit entre elles les molécules intégrantes, et l'*affinité* est celle qui unit les molécules hétérogènes. On rencontre dans les corps composés ces deux forces réunies ; dans le sulfure de fer, par exemple, les atomes de ce composé sont unis par la force de cohésion ; mais c'est l'affinité qui, dans chacun de ces atomes, unit le fer au soufre.

Pour produire une combinaison de deux corps, il faut diminuer la force de cohésion, et pour cela l'agent le plus énergique est la chaleur. Le feu, en dilatant les molécules, les écarte et affaiblit cette force de cohésion; mais on observe en même temps que la force d'affinité diminue beaucoup, puisqu'il arrive que des corps se décomposent quand on élève leur température. La chaleur, outre les effets qu'elle produit par la dilatation, en produit aussi par elle-même; car, si on mélange de l'oxigène avec de l'hydrogène, le rapport de leur volume étant de un à deux, à la température ordinaire, la combinaison ne peut pas s'effectuer, malgré l'absence de cohésion dans les deux gaz ; mais, en élevant la température à 500°, ils se combinent avec explosion, et forment de la vapeur d'eau.

La combinaison de deux corps peut s'opérer aussi sans le secours de la chaleur, à la température ordinaire, telle, par exemple, que la combinaison du soufre divisé avec du cuivre réduit en poudre fine; la combinaison du chlore avec l'arsenic ou l'antimoine; le potassium et le sodium qui, jetés sur une cuve d'eau, se décomposent, et font passer l'hydrogène de l'eau à l'état de gaz.

Cristallisation des corps.

Les corps solides jouissent de la propriété de cristalliser. Pour faire cristalliser un corps, on le dissout soit à froid, soit à chaud dans l'eau ou l'alcool. On peut aussi l'obtenir à cet état par fusion : on fond le corps dans un creuset et on le laisse refroidir lentement; quand il s'est formé une légère croûte à la surface, on la perce et on verse ce qui est resté liquide. C'est le procédé par *décantation*.

On réduit aussi le corps solide en vapeur, et on laisse refroidir, c'est la méthode par *sublimation*.

Classification des corps en général.

Les corps, considérés sous le rapport de l'ensemble de leurs propriétés chimiques, se divisent en trois grandes séries : les *acides*, les *bases* et les corps *neutres* ou *indifférents*.

Acides.

Les corps *acides*, solubles dans l'eau, rougissent la teinture de tournesol. Leur saveur est aigre et piquante.

Bases.

Les *bases*, qui portent encore le nom *d'oxides*, jouissent des propriétés opposées. Solubles dans l'eau, leur saveur est alcaline, souvent caustique et brûlante. Elles ramènent au bleu la teinture de tournesol rougie par un acide. Leur caractère le plus distinctif est leur affinité pour les acides.

Corps neutres ou indifférents.

Les corps *neutres* ou *indifférents* n'opèrent aucune réaction sur les matières colorantes et n'ont aucune affinité ni pour les acides, ni pour les bases.

Sels.

La combinaison d'un acide avec une base est appelée *sel*. Les sels sont *acides*, *basiques* ou *neutres* suivant que l'un de ces trois éléments domine dans la combinaison.

La pile décompose toujours les sels : l'acide se rend au pôle positif et la base au pôle négatif.

CHIMIE PROPREMENT DITE.

ÉTUDE DES CORPS SIMPLES, DE LEURS COMBINAISONS ET DES PROCÉDÉS EMPLOYÉS POUR LEUR EXPLOITATION.

Les corps simples se divisent en deux grandes classes : les *métaux* et les corps non métalliques, auxquels derniers on a donné le nom de *métalloïdes*.

Les propriétés générales des métaux sont leur éclat brillant et la facilité qu'ils ont à conduire la chaleur. Le contraire a lieu pour les métalloïdes. Dans leur combinaison avec l'oxigène, les métalloïdes peuvent donner des acides ou des corps indifférents, tandis que les métaux donnent des bases; c'est là la propriété la plus distinctive.

ARTICLE Ier.

MÉTALLOÏDES.

§ 1er. — HYDROGÈNE.

Ce gaz fut découvert au commencement du siècle dernier; mais Cavendish ne publia ses propriétés qu'en 1774. Parfaitement pur, ce gaz est incolore, insipide et inodore. La densité de l'air étant prise pour unité, à la température de 0° et sous la pression de 0.^{m}76, celle de l'hydrogène est égale à 0,0688. Dans les mêmes circonstances, un litre de ce gaz pèse 0^{gr}·0894; il est donc environ douze mille fois plus léger que l'eau.

L'hydrogène éteint les corps en combustion et est impropre à la respiration.

L'hydrogène est de tous les gaz celui qui réfracte le plus la lumière.

La chaleur dégagée par l'hydrogène est suffisante pour opérer la fusion de 313 grammes de glace.

Il est peu soluble dans l'eau; cette dernière en dissout un centième et demi de son volume.

Combinaison de l'hydrogène avec l'oxigène.

Si on prend une certaine quantité d'hydrogène et d'oxigène, on n'obtient qu'un mélange H+O; mais si on élève la température jusqu'à 5 à 600°, les deux gaz produisent de l'eau, et la combinaison s'opère toujours dans le rapport de deux volumes d'hydrogène pour un d'oxigène. Il existe aussi une combinaison dans laquelle les gaz s'unissent à volumes égaux, c'est le *bioxide d'hydrogène* ou *eau oxigénée*, dont la découverte est due à M. Thénard.

Par l'action d'une étincelle éléctrique, on peut aussi favoriser la formation de l'eau, et c'est à ce procédé qu'on a recours pour étudier le rapport suivant lequel les deux gaz se combinent. Dans un mélange d'hydrogène et d'oxigène, un fil de platine à la température de 60 à 70° devient incandescent, et la combinaison s'opère avec détonnation. Si on dirige un courant d'hydrogène sur une éponge de platine, elle devient incandescente et enflamme le courant de gaz. On construit des lampes en s'appuyant sur ce principe, et c'est à M. Gay-Lussac qu'on en doit l'invention.

Le noir de platine plongé dans un mélange d'hydrogène et d'oxigène en produit la combinaison qui s'opère avec détonnation.

Etat de l'hydrogène. — L'hydrogène ne se rencontre pas pur dans la nature, mais il se trouve presque partout à l'état de combinaison.

Préparation de l'hydrogène. — On le prépare en l'extrayant de l'eau; on enlève à cette dernière son oxigène au moyen de métaux qui ont une grande affinité pour ce dernier gaz; mais on est obligé d'avoir recours à la chaleur. Un moyen plus simple consiste à le préparer à la température ordinaire et dans toutes espèces de vases. Il est fondé sur la propriété d'affinité de certains acides sur certaines bases; ainsi, si on met dans un flacon ordinaire de l'eau, du zinc et de l'acide sulfurique, l'acide ayant beaucoup d'affinité pour le protoxide de zinc, l'eau se décompose, et le gaz hydrogène contenu dans cette eau se dégage dans une cloche préparée à cet effet. Si on voulait dégager une grande quantité d'hydrogène, il conviendrait d'employer un flacon à deux tubulures. L'acide sulfurique doit être étendu d'eau pour éviter une réaction violente. Si, à la place du zinc, on employait du fer, il faudrait verser de l'acide concentré à cause de son peu d'affinité pour l'oxide de fer.

Examinons les proportions d'eau, de zinc et d'acide sulfurique qu'il convient d'employer pour que l'opération se fasse le mieux possible.

Equivalents. — L'eau est composée en poids de 12.gr.479 d'hydrogène pour 100 grammes d'oxigène; et appelons 100 grammes d'oxigène, un *équivalent d'oxigène;* mais avant, convenons que l'on entend par équivalent d'un corps quelconque, le poids de ce corps capable de se combiner sans résidu avec son équivalent d'oxigène, pour produire la combinaison de ce corps la moins oxigénée, dans le cas où il se combinerait avec l'oxi-

gène en plusieurs proportions. Enfin entendons par équivalent d'un corps composé, le poids de ce corps contenant un équivalent du corps qui y entre dans la plus petite proportion. Prenons un équivalent d'oxigène et d'hydrogène dont le poids sera 112.gr.479 et la formule HO, plus un équivalent de zinc dont le poids est 403.gr.23, Zn; enfin un équivalent d'acide sulfurique, 501.gr.16, SO^3, composé d'un équivalent de soufre, 201.gr.16, et trois équivalents d'oxigène 300gr.; ces trois corps réagiront dans les rapports de 112.gr.479 à 403.gr.23 et à 501.gr.16. Mais il convient de mettre un excédant d'eau, parce qu'elle dissout le sel formé et remet à nu le métal sur lequel l'acide sulfurique agit plus énergiquement. Le résultat de l'opération exprimé en formule chimique, est celui-ci :

$$HO + Zn + S.O^3 = H + ZnO.SO^3.$$

La lettre H représente 1 hydrogène qui se dégage, ZnO. SO^3 l'équivalent de sulfate de zinc qui reste, formé de l'équivalent d'acide sulfurique SO^3 et d'un équivalent de protoxide de zinc ZnO.

EAU OXIGÉNÉE OU BI-OXIDE D'HYDROGÈNE.

Sa découverte, comme nous l'avons vu, est due à M. Thénard. Sa formule est HO^2.

Propriétés. — C'est un liquide incolore, d'une densité égale à 1,452. Il attaque la peau et détruit les matières tinctoriales en les ramenant au blanc. — On n'a pu, jusqu'à présent, le solidifier. — Par l'action de la chaleur, il se décompose en eau et en oxigène.

Préparation. — Il se prépare en traitant le bi-oxide de barium par l'acide fluorhydrique.

$$BaO^2 + HFl = BaFl + HO^2.$$

Usages.— On emploie le bi-oxide d'hydrogène pour réparer les anciens dessins et tableaux à l'huile altérés par le sulfure de plomb.

§ 2. — OXIGÈNE.

Le corps qui a le plus d'affinité pour l'hydrogène est l'*oxigène.* Le chimiste anglais Priestley est le premier qui étudia ses propriétés et les publia en 1774.

Propriétés physiques. — L'oxigène est un gaz incolore, insipide et inodore; sa chaleur spécifique comparée à celle de l'eau est égale à 0,242 : sa densité, en prenant celle de l'air pour unité, est 1,1026 d'après Dulong et Petit; mais d'après

les dernières recherches de MM. Dumas et Boussingault, cette densité serait égale à 1,1057.

L'oxigène est éminemment propre à la combustion des corps; il l'est également à la respiration.

L'oxigène est un corps permanent, car il n'a pas changé d'état sous une pression de 400 atmosphères, et sous un froid de 100°.

L'eau dissout environ $^{1}/_{27}$ de son volume d'oxigène. Aussi, on peut généralement recueillir ce gaz sous l'eau quand on ne veut pas le faire servir à des expériences de précision; mais si on veut l'avoir parfaitement pur, on doit le recueillir sous le mercure. MM. Gay-Lussac et de Humboldt, dans leurs recherches sur l'eudiométrie, ont donné un moyen d'obtenir des gaz solubles dans l'eau dans un état de pureté beaucoup plus grand que par les moyens employés ordinairement : il consiste à prendre un tube recourbé qui se relève jusqu'au haut de la cloche; alors, le gaz ne se trouvant plus en contact qu'avec une seule couche de liquide, se dissout beaucoup moins.

Propriétés chimiques. — L'oxigène se combine avec tous les corps simples, excepté avec le fluor, corps que jusqu'à présent on n'a pu isoler. Les combinaisons de l'oxigène avec tous les autres corps simples sont dans les proportions de 1 à 2, à 3, à 4, et quelquefois de 1 à 1 1/2 ou à 2 1/2.

En s'unissant avec un métalloïde, de manière à ne fournir qu'un seul acide, cet acide est désigné par le nom du métalloïde suivi de la terminaison *ique*. S'il y a deux acides, on conserve au plus riche en oxigène la dénomination précédente, et, pour le second, on substitue la terminaison *eux* à la terminaison *ique*. S'il y en a trois ou quatre, on a recours pour le second et le quatrième à la préposition *hypo* (sous), que l'on place avant le nom du premier et du troisième acide, et on conserve à ceux-ci les noms précédemment indiqués.

La nomenclature des acides ne s'étend pas plus loin, car on ne connaît pas de corps qui, par sa combinaison avec l'oxigène, fournisse plus de quatre acides.

Quand la combinaison de l'oxigène avec un métal ou un métalloïde n'est pas acide, on lui donne le nom d'oxide suivi du nom du métal ou du métalloïde. Les noms de *protoxide*, *deutoxide*, *tritoxide*, etc., les distinguent par ordre de leur grande richesse.

Les oxides qui contiennent un équivalent et demi ou bien

trois équivalents d'oxigène pour un équivalent de ce corps, sont appelés *sesquioxides et trioxides.*

L'oxigène s'unit avec l'hydrogène en deux proportions, et donne naissance à de l'eau et à du bi-oxide d'hydrogène.

L'oxigène ne se combine pas directement avec le chlore, même à l'aide de la chaleur ou de l'électricité; mais par des moyens indirects on obtient quatre proportions différentes : *oxide de chlore*, *acides chlorique*, *hypochlorique et chloreux.*

Le brôme et l'iode se combinent aussi indirectement avec l'oxigène, et se comportent comme le chlore.

Le soufre, à la température ordinaire, ne présente aucune affinité pour l'oxigène, mais il agit directement au moyen de la chaleur. Il se forme de l'*acide sulfureux*, et une faible quantité d'acide *sulfurique anhydre.*

Le carbone chauffé au rouge sombre et plongé dans de l'oxigène, brûle sans flamme et ne laisse aucun résidu. Les produits de cette combustion sont variables, suivant la quantité de carbone et d'oxigène employée. Si le carbone est en excès, on a de l'*oxide de carbone* représenté par CO. Si on a un excès d'oxigène, on obtient de l'acide carbonique CO^2.

Le phosphore, en s'unissant à l'oxigène, donne naissance à un oxide et à quatre acides.

Le bore avec l'oxigène à la chaleur rouge donne de l'*acide borique.*

Le silicium ne se combine qu'indirectement avec l'oxigène, et donne naissance à de l'*acide silicique* ou *silice.*

L'azote ne s'unit à l'oxigène que par voie indirecte, et donne lieu à cinq combinaisons, dont deux oxides et trois acides.

Les métaux peuvent se conserver dans l'oxigène sec et pur; mais quand il est humide, plusieurs métaux s'oxident, et principalement les métaux alcalins.

Les métaux, dans leur état ordinaire, ne peuvent se combiner avec l'oxigène qu'au moyen d'une chaleur considérable, ou quand on les réduit en poudre très-fine; c'est ainsi que le fer très-divisé brûle à la température ordinaire si on le laisse tomber dans l'oxigène.

Etat naturel. — C'est le corps qui est le plus répandu dans la nature. Il constitue les $\frac{10}{11}$ du poids de l'eau, et les 0,23 de celui de l'air. Il forme les 0,52 du poids de la silice qui compose la plus grande partie du globe terrestre.

Préparation.—On l'extrait ordinairement d'un oxide métallique, du peroxide de mercure ou de l'oxide d'argent. Mais le plus généralement on l'extrait du bi-oxide de manganèse bien pulvérisé, qu'on chauffe au rouge dans une cornue de grès ou de fer. Cette réaction est exprimée en équivalents chimiques de la manière suivante :

$$3\,MnO^2 = 2O + Mn^3O^4.$$

Comme le bi-oxide de manganèse contient toujours un peu de carbonate de manganèse, pour séparer l'acide carbonique qui se produit, on purifie l'oxigène en le faisant passer sur de la potasse. On prépare aussi l'oxigène au moyen du chlorate de potasse, en le chauffant dans une cornue de verre ; il reste du chlorure de potassium.

$$K.\,O.\,Ch\,O^5 = 6\,O + K.\,Ch.$$

Pour vérifier la pureté de l'oxigène, on emploie le phosphore qu'on fait monter dans une cloche courbe remplie de mercure : en faisant arriver du gaz oxigène, il se forme de l'acide phosphorique, et il n'y a pas de résidu gazeux si l'oxigène est pur. On peut se fonder encore sur la loi de la composition de l'eau, car en faisant passer dans un eudiomètre deux volumes d'hydrogène et un volume d'oxigène, la combinaison doit s'opérer sans résidu, si le gaz est pur.

§ 3. — CHLORE.

Propriétés physiques. — Le chlore a été découvert par Scheèle en 1774.

Le chlore est d'une couleur jaune verdâtre; son odeur est très-forte et très-piquante. Il est impropre à la combustion et à la respiration.

La densité du chlore est égale à 2,240, et un litre de chlore pèse environ 3.gr170.

Le chlore peut se liquéfier étant soumis à une pression de quatre à cinq atmosphères, sous une température voisine de 0°. M. Gay-Lussac a trouvé que le chlore liquide avait pour densité 1.33, celle de l'eau étant prise pour unité.

A la température ordinaire, le chlore est soluble dans l'eau qui en dissout un volume double du sien. L'eau conserve après cette dissolution une couleur analogue à celle du gaz, et à l'état de saturation sa dissolution ne contient pas plus de 0.006 de son poids de chlore; elle porte le nom d'eau de chlore et doit être conservée dans l'obscurité ou dans des flacons de verre coloré.

Propriétés chimiques. — Le chlore en s'unissant avec l'hydrogène ne donne lieu qu'à une seule combinaison chimique, c'est l'acide chlorhydrique, formé d'un équivalent d'hydrogène et d'un équivalent de chlore.

L'oxigène s'unit en quatre proportions avec le chlore, mais la combinaison n'a pas lieu directement, parce que les corps qui en résultent sont décomposables par la chaleur.

Les métaux se combinent avec le chlore, soit à la température ordinaire, soit au moyen de la chaleur.

Le chlore exerce une action très-énergique sur les matières végétales, à cause de son affinité pour l'hydrogène qu'elles contiennent.

C'est d'après cette remarque que Berthollet indiqua l'emploi de l'eau de chlore pour le blanchiment du linge et la confection des toiles peintes.

En vertu de cette même affinité pour l'hydrogène, le chlore est employé pour détruire les miasmes qui sont répandus dans l'air.

Préparation. — On le prépare ordinairement de deux manières : 1° au moyen de l'acide chlorhydrique et du peroxide de manganèse. Voici le résultat de l'opération exprimé en équivalents chimiques :

$$2\ (H.\,Ch) + Mn\,O^2 = 2\ (H.\,O) + Ch.\,Mn.$$

Le second moyen consiste à mélanger intimement trois parties de sel marin et deux de peroxide de manganèse; on verse de l'acide sulfurique, et, à l'aide d'une douce chaleur, le chlore du sel marin est mis en liberté.

§ 4. — BRÔME.

Ce corps a été découvert en 1826 par M. Balard, dans les eaux-mères des lacs salins de la Méditerranée. On rencontre le brôme dans les eaux de la Mer-Morte, dans les salines de l'Allemagne, et, tout récemment, M. Berthier l'a rencontré dans les mines de plomb argentifère de Poullaouen et d'Huelgoët.

Propriétés physiques. — A la température ordinaire, le brôme est liquide, mais on parvient à le solidifier au moyen d'un mélange réfrigérant. En masse, le brôme paraît d'un noir foncé, mais vu en petite quantité, il est d'un beau rouge hyacinthe. Son odeur est forte et fétide comme l'indique le nom qu'on lui a donné. Sa densité est de 2,966. Il entre en ébul-

lition à la température de 47°. Il est peu soluble dans l'eau, et sa dissolution, exposée au contact de l'air, laisse dégager des vapeurs de brôme. L'alcool et l'éther sulfurique peuvent dissoudre le brôme en toute proportion.

Propriétés chimiques. — Ses propriétés sont analogues à celles du chlore. Il se combine avec les mêmes corps et dans les mêmes proportions.

Préparation. — Il s'extrait des brômures qui le contiennent, en les traitant par le peroxide de manganèse et l'acide sulfurique.

Usages. — Le brôme est employé dans les laboratoires de chimie, et ses usages y sont encore très-bornés.

§ 5. — IODE.

Ce corps a été découvert en 1811 par M. Courtois, manufacturier. M. Gay-Lussac compléta l'étude des diverses propriétés de l'iode.

L'iode se rencontre en petite quantité dans l'eau de la mer et dans les salines; il a été trouvé aussi dans les mines d'argent du Mexique à l'état d'iodures.

Propriétés physiques. — L'iode est un corps solide à la température ordinaire, mais il se réduit en vapeurs à la température de 50 à 60°. Son aspect est le même que celui de la plombagine. Il cristallise en paillettes très-larges, de forme rhomboïdale; il cristallise aussi en octaèdres. La densité de l'iode est 4,946. Son odeur rappelle celle du chlore; sa saveur est piquante et vénéneuse. Soumis à l'action de la chaleur, l'iode entre en pleine ébullition à une température de 175° à 180° du thermomètre centigrade. La densité des vapeurs d'iode est de 8,618. Ce corps est peu soluble dans l'eau, qui en prend environ 1/7000. L'alcool dissout l'iode en grande quantité; il en dissout la moitié de son poids, et la couleur de la dissolution est d'un brun très-foncé.

L'iode jouit de la propriété de colorer l'amidon en bleu très-intense, ce qui permet de constater les plus petites traces d'iode dans l'eau.

Propriétés chimiques. — l'iode ne se combine pas directement avec l'hydrogène; il faut avoir recours à l'étincelle électrique; dans ce cas, il y a formation d'acide iodhydrique.

L'iode se combine en trois proportions avec l'oxigène, mais indirectement. Il se combine avec les métaux dans les mêmes proportions que le chlore.

Préparation. — Il se prépare au moyen de l'acide sulfurique concentré qu'on verse dans une cornue A (*fig.* 19, *Pl.* VII), contenant des eaux-mères provenant de la lessive de soude de varech. Ces eaux-mères contiennent, outre plusieurs sels alcalins, principalement une grande quantité d'iodure de potassium. L'iode se dépose à l'état solide sur les parois de la cornue ou de l'allonge B, où il vient se condenser dans l'eau du matras C.

Ce procédé est sujet à donner des résultats très-variables, en raison de ce qu'une portion de l'iode passe à la distillation soit à l'état d'acide iodhydrique, soit à l'état de chlorure d'iode. M. Soubeiran avait proposé de précipiter l'iode des eaux-mères au moyen du sulfate de cuivre, et de décomposer ensuite l'iodure de cuivre par le peroxide de manganèse à une température élevée; mais ce procédé exige des soins trop minutieux. Depuis quelque temps, les fabricants d'iode ont employé un procédé beaucoup plus simple : il consiste à précipiter l'iode des eaux-mères au moyen d'un courant de chlore. On calcine le résidu des eaux-mères de soude varech avec un dixième de son poids de peroxide de manganèse en poudre. On fait ainsi passer à l'état de sulfate tous les sulfures et hyposulfites. On arrête la calcination quand on voit se dégager des vapeurs violettes qui accusent la présence de l'iode. On dissout le résidu dans l'eau de manière à obtenir une dissolution à 36° de l'aréomètre; c'est dans cette dissolution qu'on fait passer un courant de chlore, en ayant soin d'agiter avec un tube de verre. La liqueur se colore, se trouble et finit par précipiter l'iode sous forme d'une poudre noire. On peut se servir d'un procédé analogue pour l'extraction du brôme. Il est fondé sur la plus grande affinité du chlore et sur la propriété qu'il possède de déplacer le brôme de ses combinaisons.

Usages. — On s'en sert dans la médecine pour le traitement des maladies scrofuleuses et pour les goîtres. On l'emploie aussi pour recouvrir les plaques des daguerréotypes et dans la peinture; on s'en sert à l'état de bi-iodure de mercure.

§ 6. — FLUOR.

Ce corps n'a pas pu encore être isolé. On le rencontre dans le spath fluor ou fluorure de calcium, que l'on s'accorde à considérer comme composé d'un équivalent de calcium et d'un équivalent de fluor, F l C a. Pour préparer ce corps, on avait construit des vases en fluorure de calcium; mais aussitôt

formé, ce corps attaquait la matière dans laquelle on cherchait à l'isoler. On a opéré dans des vases de verre, d'or, de platine, mais sans résultat.

§ 7. — SOUFRE.

Ce corps est connu de toute antiquité, et on le rencontre souvent dans la nature à un état de pureté presque parfait.

Propriétés physiques.—Il est solide à la température ordinaire. Sa couleur est jaune citron un peu verdâtre. Il est sans odeur, mais quand on le frotte, il développe de l'électricité négative, et il répand une légère odeur. Il est très-mauvais conducteur de la chaleur; aussi, quand on le chauffe même à la chaleur de la main, le soufre fait entendre un petit craquement provenant de la désaggrégation de ses molécules. Sa densité est de 2,087, à l'état de pureté. Soumis à l'action de la chaleur, il fond vers 107 ou 109°, et si on l'examine alors, sa fluidité est parfaite. Sa couleur est d'un jaune très-beau. Quand on élève la température jusqu'à 140°, il commence à perdre de sa fluidité; de 140° à 160°, il s'épaissit, et sa couleur est brune plus ou moins foncée; enfin à 220° il devient presque solide et est d'un rouge brun; et entre 220 et 250°, il acquiert une consistance telle qu'on peut renverser le vase qui le contient sans que la matière change de place; si on chauffe davantage, il reprend sa fluidité jusqu'à ce qu'enfin il entre en ébullition à 400°.

Propriétés chimiques. — A la température ordinaire, et même jusqu'à 100 degrés, le soufre se conserve dans l'air et même dans l'oxigène sans altération. Quand on brûle du soufre dans un flacon rempli d'oxigène, il y a formation d'acide sulfureux SO^2 et d'une légère quantité d'acide sulfurique SO^3.

L'hydrogène s'unit avec le soufre en plusieurs proportions. Le soufre se combine directement avec le chlore, le brôme et l'iode, et avec tous les métaux. On sait qu'à la température ordinaire le cuivre très-divisé se combine avec le soufre, et que le produit qui en résulte est du sulfure de cuivre.

Etat naturel. — Le soufre existe dans tous les volcans éteints ou en activité; on la trouve mêlé de terre et on le rencontre presque à l'état de pureté dans les solfatares. Il existe dans les eaux minérales, les œufs et dans toutes les plantes crucifères; enfin il entre dans une foule de combinaisons : sulfures de plomb, de fer, etc.

Préparation. — Le soufre qu'on traite dans le commerce provient des solfatares ; on le fond dans des vases de terre pour le débarrasser de ses impuretés, telles que les matières pierreuses et terreuses qu'il contient, et on le purifie ensuite. Cette opération s'exécute dans une grande chambre en maçonnerie A (*fig.* 20), munie latéralement d'un fourneau F destiné à recevoir une chaudière de tôle C et dans laquelle on place le soufre ; en chauffant, le soufre se dégage en vapeurs qui se condensent dans la chambre A : on obtient ainsi le soufre à l'état de fleur, qui est encore impure : en continuant l'opération, le soufre se fond, et par l'ouverture B on le reçoit dans des vases en bois. Le soufre contient toujours une matière bitumineuse qui se décompose au feu et forme, dans la chambre, un mélange détonnant qui peut la briser. Pour éviter ce grave inconvénient, on n'introduit dans la chaudière que du soufre décanté, et on remplace la chaudière en fonte ou en tôle par l'appareil suivant (*fig.* 21). C'est un cylindre en fonte A de 1^m 50 (4 pieds 7 pouces) de longueur sur 48 centimètres (1 pied 5 pouces) de diamètre intérieur. Il est placé horizontalement, la flamme l'enveloppe de toutes parts et passe sous une chaudière B en fonte. Le cylindre A est adapté à un ajutage C de même diamètre et de 1 mètre (3 pieds) de longueur, encastré dans la paroi de la chambre construite en briques, laquelle repose sur un sol très-solide. A l'embouchure de l'ajutage on suspend un registre R, pour éviter une trop grande production de gaz. La partie supérieure de la chambre est munie d'une soupape L, et à la partie inférieure se trouve un tuyau T destiné à conduire le soufre dans une chaudière S. Un ouvrier prend alors le soufre et le moule dans des formes coniques en bois V (*fig.* 22) qu'on dispose dans un baquet rempli d'eau froide ; au sortir des moules, opération qui s'exécute au moyen d'un petit appendice en bois *u*, qu'on pousse de bas en haut, le soufre est d'une belle couleur jaune. Les chambres ont une capacité d'environ 1^m 371 déc. cubes (40 pieds cubes).

Si l'on veut obtenir du soufre en fleur, le même appareil peut servir ; mais il faut avoir soin de ne pas élever la température au-delà de 109°. Il faut donc distiller une petite quantité de soufre, 100 kil. (200 livres) environ par 24 heures ; cette cause augmente beaucoup la valeur de la fleur de soufre. Le soufre en canon est sensiblement plus pur que le soufre en fleur, qui, n'ayant pas été liquide, contient encore des matières impures. Il convient donc de laver la fleur avec de l'eau.

Le soufre se fabrique encore différemment. On emploie pour cela des creusets coniques contenant 12 à 15 kil. (24 à 30 livres) de bisulfure de fer. Ces appareils ont été perfectionnés, et, actuellement, dans des creusets cylindriques, on peut distiller 25 kil. (50 livres) par chaque cylindre : on distille environ 0,14 de sulfure. Si on poussait plus loin l'opération, on courrait risque d'attaquer les creusets. Tous ces cylindres sont renfermés dans un four en maçonnerie, au nombre de sept à huit, et trois grilles suffisent pour opérer la distillation.

Applications du soufre.—A l'état brut, il sert principalement à la fabrication de l'acide sulfurique. On l'emploie encore pour sceller. Pour obtenir un bon scellement, on doit diminuer le retrait du soufre en le mélangeant de sable ou d'un ciment quelconque.

Le soufre raffiné sert à la fabrication des mèches soufrées, à la fabrication des médailles.

Le soufre en fleur mélangé avec du suif forme une graisse très-bonne pour adoucir les frottements ; mélangé avec de la limaille de fer, il constitue un mastic très-dur et d'un continuel usage dans les arts.

Par la propriété de l'acide sulfureux qui éteint les corps en combustion, on brûle de la fleur de soufre pour arrêter les feux de cheminée, en en répandant dans le foyer. Le soufre s'emploie encore pour le blanchiment des matières animales. Il sert à la fabrication de la poudre, dans laquelle il entre pour les 0,125 de son poids. Mêlé au chlorate de potasse, il donne une poudre très-fulminante. Enfin il est employé pour le traitement de toutes les maladies de la peau.

§ 8. — SÉLÉNIUM.

Il a été découvert en 1817, dans la pyrite cuivreuse de Fahlun, composée de sulfure de fer et de sulfure de cuivre. Ce corps est très-rare. En Suède on le rencontre dans quelques cristaux cubiques de galène et dans des pyrites.

Propriétés physiques.—Le sélénium est un corps solide à la température ordinaire. Sa densité est 4,32. Exposé à la chaleur, le sélénium se remollit et fond à une température un peu supérieure à 100°; chauffé graduellement comme le soufre, il présente à peu près les mêmes propriétés que nous avons observées pour ce corps avec lequel il a, du reste, la plus grande analogie.

Propriétés chimiques. — Abandonné au contact de l'air, le sélénium s'y conserve indéfiniment. Avec l'oxigène, il forme

trois combinaisons : l'oxide de sélénium SeO, corps gazeux qui a une odeur fétide, l'acide sélénieux SeO^2 et de l'acide sisélénique SeO^3. Mais cette dernière combinaison n'a jamais lieu directement.

L'hydrogène se combine indirectement avec le sélénium, et donne naissance à l'*acide sélénhydrique*.

Le chlore, le brôme, l'iode et le phosphore s'unissent directement avec le sélénium.

Les métaux s'unissent presque tous avec le sélénium, et les séléniures qui en résultent ont la plus grande analogie avec les sulfures correspondants.

Préparation. — On se le procure en l'extrayant des sulfures métalliques qui contiennent des séléniures. On calcine au contact de l'air le minerai réduit en poudre fine. Il y a transformation en acide sulfureux qui se dégage et en acide sélénieux qui se dépose sous la forme d'une poudre blanche et cristalline. On dissout dans l'eau, et traite par l'acide sulfureux qui décompose l'acide sélénieux; son oxigène se porte sur l'acide sulfureux pour former de l'acide sulfurique, et le sélénium se dépose au fond du vase sous la forme d'une poudre d'un rouge cinabre.

$$2SO^2 + SeO^2 = 2SO^3 + Se.$$

Usages. — Il n'en a aucun. Sa rareté fait qu'on ne l'emploie même pas dans les laboratoires.

§ 9. — PHOSPHORE.

Sa découverte remonte à l'année 1669.

Propriétés physiques. — Le phosphore est solide à la température ordinaire; sa densité est 1, 77. Il est blanc, légèrement jaunâtre, quelquefois incolore, tantôt transparent, tantôt seulement translucide, ou enfin tout-à-fait opaque.

L'eau en dissout une quantité tellement faible, qu'elle échappe à tous les réactifs chimiques.

Soumis à l'action de la chaleur, il entre en fusion à une température de 43°, et se réduit en vapeurs à une température voisine de 290°.

Sous l'action de la lumière, le phosphore devient d'un rouge foncé.

Etat naturel. — Le phosphore existe dans les urines et les ossements. Dans la nature, on le rencontre sous forme de phosphates. M. Vauquelin l'a découvert dans les nerfs et dans toute la matière cérébrale.

Préparation. — On l'obtient par la calcination des os au contact de l'air ; la gélatine et le carbone sont réduits, et il reste du sous-phosphate de chaux et quelques autres sels. On traite par l'acide sulfurique; il y a formation de sulfate de chaux, de phosphate acide de chaux, qui est soluble. On l'isole, on le mêle avec du charbon pilé, et on chauffe graduellement jusqu'à une température très-élevée. Le carbone se réduit en acide carbonique, s'empare de la chaux, forme du carbonate de chaux, et le phosphore se distille. Dans cet état, il n'est pas encore bien pur, car il a entraîné du charbon dans sa distillation ; pour le purifier, on le fond sous l'eau, et on le filtre dans une peau de chamois.

Pour distiller le phosphore, il convient d'opérer sur des quantités très-faibles. On fait usage d'un appareil en verre, qui a la forme indiquée *fig.* 23. On chauffe la partie A, et le phosphore va se condenser dans la panse B. On chauffe la panse B, pour faire subir une nouvelle distillation : le phosphore s'échappe par l'extrémité C, qui plonge d'une petite quantité dans de l'eau tiède.

Usages. — Les usages du phosphore sont très-peu répandus. On s'en sert dans les laboratoires de chimie, et dans le commerce pour la fabrication des briquets.

§ 10. — ARSENIC.

L'arsenic est très-répandu dans la nature, mais rarement à l'état natif. On le rencontre en combinaison avec les métaux, tels que le fer, le cuivre, le nickel, le cobalt; il forme avec eux des arseniures qui ont la propriété d'être très-cassants.

Propriétés physiques. — L'arsenic est solide à la température ordinaire. Il a l'éclat métallique, ce qui l'a fait ranger par plusieurs chimistes au nombre des métaux. L'arsenic, exposé au contact de l'air, se recouvre bientôt d'une poudre blanche, qui n'est autre que l'acide arsenieux, et qui est connue dans le commerce sous le nom d'arsenic.

L'arsenic est totalement insoluble dans l'eau. Il est très-mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité. A la température ordinaire ce corps est inodore; mais, projeté sur des charbons ardents, il brûle et répand dans l'air des fumées blanchâtres, avec une odeur d'ail très-prononcée. La densité de l'arsenic est 5,75; celle de sa vapeur est égale à 10,6.

Préparation. — On le prépare au moyen d'un arseniure

métallique. On grille, pour chasser le soufre, et l'arsenic se condense sous forme de poudre blanche. On traite cet acide arsenieux par le charbon, et on obtient l'arsenic métallique.

Usages. — On l'emploie dans la médecine et dans les laboratoires de chimie.

§ 11. — TELLURE.

Ce corps, à cause de son éclat métallique, a été, comme l'arsenic, classé par plusieurs chimistes avec les métaux. Il a une grande ressemblance avec l'antimoine. Sa densité est 6,60. Il fond à la température rouge sombre, et se volatilise à celle du rouge blanc.

Ce corps est extrêmement rare; aussi est-il sans usages.

§ 12. — AZOTE.

L'azote est un gaz très-répandu dans la nature; il forme les $^4/_5$ environ de l'atmosphère.

Propriétés physiques. — L'azote est incolore, insipide et inodore. Plusieurs chimistes ont donné la densité de ce gaz, qui, d'après M. Berzélius, est de 0,976; selon MM. Dumas et Boussingault, d'après des expériences plus récentes, 0,972. Le poids de l'équivalent est représenté par 177 gr.03.

Ce gaz est impropre à la respiration, et donne promptement la mort par l'asphyxie. Il n'est pas inflammable, et est impropre à la combustion.

Propriétés chimiques. — C'est un corps presque entièrement passif, et on le reconnaît principalement par l'absence de toute action sur les autres substances. Cependant, en présence de l'hydrogène et de l'oxigène en excès, il se produit un peu d'acide azotique, AzO^5. D'après les expériences de M. Despretz, en faisant passer un courant d'azote sur du fer rouge, dans un tube de porcelaine, il se produit toujours un peu d'azoture de fer.

Préparation. — L'azote s'obtient généralement de l'air, en absorbant l'oxigène de celui-ci. On le prépare aussi en faisant dissoudre du bi-oxide d'azote dans de l'acide sulfurique, mêlé avec de l'ammoniac. Voici le résultat de l'opération exprimé en équivalents chimiques :

$$2\,H^3\,Az + 3\,AzO^2\,A = 6\,HO + 5\,Az.$$

Usages.— L'azote n'est employé que pour remplir des vases dans lesquels on peut faire des expériences à l'abri du contact de l'oxigène.

Moyens de reconnaître la présence de l'azote. — On mêle la

substance à analyser avec de la potasse, à froid. Il se dégage de l'ammoniac, et si le dégagement n'a pas lieu à froid, on doit chauffer. Ce caractère est bon, quand le gaz est en grande quantité; mais, si le contraire avait lieu, il serait équivoque, car le zinc, l'étain, chauffés avec la potasse, laissent dégager de l'azote; mais ici, c'est l'azote de l'air qui s'unit avec l'hydrogène de l'eau décomposé pour donner de l'ammoniac. On doit donc recourir à un autre moyen. On prend de la limaille de cuivre sur laquelle on verse de l'acide sulfurique, puis un azotate; on ajoute de l'eau, et la réaction se manifeste en laissant dégager des vapeurs nitreuses; ce gaz, ici, n'est dû qu'à la décomposition de l'azotate. On peut aussi donner naissance à du cyanogène, en mêlant une matière azotée avec du charbon et de la potasse, et porter au rouge; il y a formation de cyanure de potassium. Pour s'en assurer, on traite le résidu par l'eau, et on verse un mélange de protoxide et peroxide de fer; il y a formation de bleu de Prusse et d'oxide de fer. On dissout cet oxide par de l'acide chlorhydrique, le bleu de Prusse apparaît : toute la matière qui contient de l'azote se reconnaît ainsi. Quand on veut analyser une matière azotée, on peut suivre la marche suivante : on calcine la matière avec du cuivre et de l'oxide de cuivre, qu'on introduit dans la partie A (*fig.* 24) d'un tube formé à l'une de ses extrémités; en B on place du carbonate de plomb, et en C et D de l'oxide de cuivre et du cuivre. On fait le vide dans l'appareil au moyen de la pompe N, et le mercure monte dans le tube X Y. Pour enlever tout-à-fait l'air de l'appareil, on chauffe l'extrémité B du tube qui contient du carbonate de plomb, et l'acide carbonique qui se dégage expulse tout l'air qu'il rencontre; on absorbe ensuite ce gaz au moyen de la potasse. On chauffe alors au rouge le cuivre, l'oxide et le mélange, et les gaz se rendent dans la cloche R; on absorbe de nouveau l'acide carbonique au moyen de la potasse, et, pour expulser tout l'azotate, on recommence par chauffer le carbonate de plomb. On obtient aussi les mêmes résultats par un appareil plus simple (*fig.* 25). La cuvette A contient une dissolution de potasse, et, pour faire le vide, on dégage environ deux à trois litres d'acide carbonique.

§ 13. — CARBONE.

Le carbone est du charbon purifié. On le rencontre dans ..tes les matières organiques et dans l'atmosphère, où les ..absorbent pour leur végétation.

Dans la nature, et à l'état impur, le carbone se présente sous une foule d'états qui portent différents noms, suivant les divers aspects qu'il présente.

1° *Charbon de bois.* — Il provient de la calcination, en vase clos ou à l'air libre, du bois. Il est noir, très-léger, contenant toujours un peu d'hydrogène et des cendres, lesquelles renferment du fer, du manganèse, de l'alumine, et principalement de la soude et de la potasse.

Dans l'intérieur de la terre, on rencontre le carbone à l'état de *houille* ou *charbon de terre*. Ce charbon est très-impur. Il contient beaucoup d'hydrogène et de matières bitumineuses. Soumises à l'action de la chaleur, certaines qualités de houille se dilatent et triplent de volume; souvent, quand elles contiennent beaucoup de matières bitumineuses, elles se ramollissent et entrent en fusion. Chauffées dans un vase clos, elles donnent, à la distillation, de l'hydrogène bi-carboné, qui est le gaz de l'éclairage, et laissent un résidu connu sous le nom de *coke*.

2° *Anthracite.*—Ce charbon contient très-peu d'hydrogène, et, par cela seul, brûle très-difficilement. Ce carbone est presque pur, car les cendres, après complète incinération, sont égales au plus à 0,02 de son poids.

3° Il existe encore un charbon naturel appelé *plombagine*, *mine à crayon* et *graphite*. Il se présente soit sous forme de masse, soit en lames minces, tantôt ternes et tantôt brillantes. Ce carbone est encore presque pur, mais il contient un peu de fer. Dans la fabrication de la fonte, quand elle est très-riche en charbon, il se dépose toujours une certaine quantité de graphite.

4° Le *noir de fumée* provient de la calcination des matières résineuses. C'est un corps pulvérulent assez riche en hydrogène.

5° *Noir animal*, ou charbon provenant de la calcination des os en vase clos. Ce charbon est très-impur, et ne renferme pas au-delà de 0,12 de son poids de carbone. Le reste est composé de phosphate basique de chaux et de quelques autres sels. Il jouit de la propriété décolorante au plus haut degré, et sert principalement dans le raffinage du sucre pour décolorer les sirops.

6° Enfin, la nature nous présente le charbon à l'état chimiquement pur, c'est le *diamant*. Il se rencontre surtout à Visapour, à Golconde et au Brésil, en cristaux isolés. Jusqu'à ce jour, le diamant ne s'est trouvé au Brésil qu'entre le 16° et le

20° 30' de latitude australe; son véritable gisement est la partie inférieure de l'itacolumite, roche de texture schisteuse composée de talc et de quartz, mais offrant une infinité de nuances.

Le diamant a un aspect vitreux et est presque toujours transparent. Mais il y en a de diversement colorés, en jaune, en rose, en bleu, en vert et en brun, et quelquefois noirs. Cette coloration paraît provenir de certains corps étrangers.

Le diamant cristallise tantôt en cubes, tantôt en octaèdres, quelquefois en dodécaèdres, et on rencontre même des cristaux à 48 facettes, lesquelles sont toujours curvilignes.

Le diamant est le plus dur de tous les corps. En 1576 on trouva, pour la première fois, le moyen de le travailler, en l'usant avec sa propre poussière. Sa densité est représentée par 3,50 et 3,55, tandis que celle du carbone ordinaire est de 2,80.

Usages du carbone. — Les usages du carbone sont des plus répandus. Dans les arts on l'emploie comme combustible, et dans la métallurgie il sert, à la fois, et de combustible et de réductif, en enlevant l'oxigène aux oxides métalliques. Il se transforme en acide carbonique lorsque l'oxide est facilement réductible; ainsi, si on chauffe ensemble un équivalent de charbon et deux d'oxide de cuivre ou d'oxide de plomb, on obtient deux équivalents du métal à l'état de liberté, et un équivalent d'acide carbonique. Cette réaction est représentée par les formules suivantes :

$$2\,CuO + C = 2\,Cu + CO^2$$
$$2\,PbO + C = 2\,Pb + CO^2$$

Si au contraire l'oxide est difficilement réductible, on obtient de l'oxide de carbone. Si on chauffe, par exemple, un équivalent de carbone avec un d'oxide de zinc, on a le métal pur et de l'oxide de carbone.

$$ZnO + C = Zn + CO.$$

FABRICATION DU CHARBON DE BOIS.

Le plus ancien des procédés est connu sous le nom de carbonisation en meules. Plus les meules sont grandes, plus le charbon est dense. On dispose, sur un terrain compact, et mieux sur un terrain qui a déjà servi à ce genre d'opération, une plate-forme sur laquelle on arrange des bûches placées en cercles; on implante au milieu une grosse bûche fendue en quatre et dans laquelle sont placés deux morceaux de bois

en croix pour soutenir le cône formé par le bois; on implante encore au milieu un pieu et on dispose autour de nouvelles bûches par-dessus ce rang, puis des branches recouvertes avec du gazon, des feuilles sèches, du chaume ou de la terre. A la base se trouve une petite ouverture qui laisse entrer l'air. Pour mettre le feu, on ôte le pieu du milieu et on met des charbons incandescents. Ces diverses opérations sont représentées par les *figures* 9, 10, 11 et 12, *Pl.* VIII.

L'art du charbonnier consiste à maintenir la température constante à l'intérieur, et pour cela on pratique des cheminées dans les endroits dits *paresseux*. Les coups de vent doivent être évités, parcequ'ils activent trop la combustion. Pour obvier à cet inconvénient, on empile les bois à charbonner autour de la meule (*fig.* 13). Quand la carbonisation est opérée, on enlève la terre calcinée qui recouvre la meule, et on jette de la terre humide. Lorsque le tas est froid, on étale tout le charbon au moyen de rables en fer. Ce procédé donne 15 à 18 p. 100 de charbon. Il est généralement suivi dans les forêts, mais il a reçu quelques modifications. La carbonisation avait lieu dans une fosse et on obtenait ainsi 22 p. 100. Des plaques en fonte recouvraient toute la sole. La température se maintenant à la partie inférieure, il se formait moins de fumerons. Ce procédé a été encore modifié de la manière suivante : on creusait en terre une fosse qu'on recouvrait d'une plaque de tôle; les bûches étaient disposées obliquement pour permettre l'écoulement de l'eau; autour du fossé, on ménageait une rigole communiquant à l'air extérieur par une cheminée pratiquée dans le sol; on recueillait ainsi l'acide pyroligneux et les produits de la combustion dans des vases réfrigérants. M. Thilorier a donné un procédé pour recueillir l'acide pyroligneux; il consiste à placer sous la meule des plaques de fonte pendant le temps de la carbonisation; la distillation se fait alors à la partie moyenne de la meule.

M. Brune a obtenu un maximum de charbon en formant un plancher avec des plaques de fonte placées au-dessus d'une fosse. La meule s'élevait au-dessus des plaques (voir la *fig.* 14). La température était maintenue alors plus régulièrement. Des conduits *a a'* servaient au dégagement des gaz.

M. Hourny a employé, à Pont-Gibaud, la méthode suivante : on rangeait, en tas circulaires de 1 mètre (3 pieds) de haut sur 8 mètres (24 pieds) de circonférence, des bûches

ayant 65 centimètres (2 pieds) de longueur; les tas se composaient de deux assises de rondins empilés debout et disposés en dôme. Au centre se trouvait une cheminée verticale remplie de menus charbons et destinée à propager le feu. On recouvrait toute la surface avec de la mousse et du fraisil tamisé. Le feu durait trente-six heures environ, et le défournement avait lieu deux heures après.

Dans les environs d'Essone, on emploie le bois de Bourdenne à la fabrication du charbon pour le service de la poudrière. Les branches ont 1 centimètre (5 lignes) de diamètre et dégarnies de leur écorce. L'opération se fait dans des cylindres en fonte (*fig.* 15). Les produits qu'on obtient par la distillation, sont de l'eau, de l'acide pyroligneux, du goudron.

Fabrication du charbon roux en forêt. (Procédé de M. Echement.)

On prépare une aire rectangulaire dans laquelle on creuse, dans le sens de la longueur, un petit canal de 0.m20 (7 pouces) de côté, qu'on recouvre de plaques de fonte arrangées de manière à laisser une issue de chaque côté du canal. En avant se trouve un foyer alimenté au moyen d'un ventilateur. On dispose le bois dans le sens perpendiculaire au canal, en ayant soin de ménager au centre une petite voûte de 50 à 60 centimètres (1 pied 6 pouces à 1 pied 10 pouces) de rayon. Voir les *figures* 38, 39 et 40, *Pl.* VIII.

Par ce procédé, on prépare 30 stères en 24 heures, et la consommation du bois dans le foyer est de 3 stères ou 1/10 de la production. Ce foyer est alimenté par des branchages qu'on ne peut pas torréfier. Le charbon obtenu de cette manière est de couleur brune jusqu'au centre, et renferme 38 p. 100 de matières volatiles, et son pouvoir calorifique est représenté par 0, 58.

Dans le département des Ardennes, on a fait plusieurs expériences en modifiant ce procédé; les *figures* 1, 2, 3, 4 et 5, *Pl.* IX, indiquent les dispositions qui ont été employées. Un poste de charbonniers peut préparer, en 24 heures, 25 à 30 stères de bois.

Dans les terrains secs, les bois ont une assez grande densité et contiennent moins d'eau que les bois qui viennent dans un terrain humide.

Les bois se forment dans la végétation de toutes les plantes; les premiers produits sécrètent des matières azotées et de la matière ligneuse.

Si on considère les bois comme composés de fibres ligneux, la sève contient plusieurs substances fermentescibles.

Les bois exposés à l'humidité se décomposent et occasionnent la pourriture ; ainsi tous les procédés qu'on emploie pour conserver les matières animales, peuvent servir aussi à la conservation des bois. Le sulfate de fer préserve assez bien les bois de la pourriture, mais le meilleur agent qu'on connaisse est le deutochlorure de mercure.

Le ligneux, à peu près pur, contient environ 52 p. 100 de carbone et 48 d'eau; mais si on tient compte des matières étrangères, on a pour 100 parties :

Charbon.	50
Eau.	46
Cendres	4

Le ligneux a une densité double de celle de l'eau.

Dans le commerce, les bois se distinguent en bois lourds et bois tendres.

Les bois s'achètent au volume, et, comme l'on sait, sous le même volume ils ont un poids plus ou moins élevé. La mesure qu'on emploie est le stère et le décastère. Depuis quelque temps le bois se vend aussi au poids; ce serait assurément le meilleur moyen de vente, car le consommateur ne serait pas trompé ; mais l'on sait que le bois flotté ou qui est arrivé par trains, contient une grande quantité d'eau, qui ne se perd en partie qu'après une longue exposition dans les chantiers.

Dans le commerce, on vend un bois appelé *bois pelard*, ce sont des bûches de chêne dont on a retiré l'écorce qu'on emploie dans la fabrication du tan.

Les bois blancs ou flambants sont préférés, dans certaines industries, aux bois durs ; aussi, dans les fours à porcelaine, à verrerie, on brûle particulièrement du bouleau. Les boulangers se servent aussi de ce bois, et la braise qui en résulte se vend à un tiers du prix du combustible. Les déchets des bois tendres sont aussi employés pour la cuisson du plâtre et de la chaux. Quant aux bois durs, on les brûle pour le chauffage des chaudières à vapeur, dans les calorifères et principalement dans les cheminées d'habitation où le rayonnement doit être très-grand.

On admet généralement que le mètre cube de charbon de bois dur, tel qu'il se trouve dans le commerce, pèse 200 à 240 kilog. (14 à 16 livres le pied cube.)

CHARBON DE DIFFÉRENTES LOCALITÉS.	POIDS du MÈTRE CUBE en kilog.	POIDS du PIED CUBE en livres.
BAIGORY (dans les Pyrénées)	185	13 $^{2}/_{3}$
FRAMONT (Vosges). — Le charbon de hêtre et de chêne	213	15 $^{1}/_{2}$
ALLEVARD (Isère). — Un mélange d'un tiers de bois dur et de deux tiers de sapin	150	11
SIBÉRIE. — Charbon de pin Sylvestre	157	11 $^{1}/_{2}$
Dans la Fichtelgebirge (Bavière.) — Charbon de pin.	141	
A EPICRE (Savoie). — Mélange de bois dur et de bois résineux	180	13
Charbon de Picardie	180	13
Charbon de l'Yonne. — Humide	250	18
Charbon de Choisy fait dans des cylindres	160 à 175	11 $^{1}/_{2}$ à 12 $^{3}/_{4}$
Charbon de Pont-Gibaut, de chêne et de hêtre	200 à 210	14 $^{1}/_{2}$ à 15
Charbon de noisetier	190	14
— bouleau	185	13
— sapin	175	12 $^{3}/_{4}$
— aulne	160	11 $^{1}/_{2}$
NIEDERBRUNN. — Le charbon pesé tout chaud, comme les précédents, donne :		
Pour le hêtre	230	15 $^{1}/_{3}$
— chêne	200	13 $^{1}/_{3}$
— pin en branches	160	10 $^{2}/_{3}$

Densité de plusieurs espèces de charbons dans l'état où ils se trouvent dans les magasins des marchands, d'après M. MARCUS BULL.

Noyer à écorce écailleuse.	625
Chêne blanc, châtaignier.	481
Frêne d'Amérique.	547
Hêtre des bois.	518
Charme.	455
Pommier sauvage.	445
Sassafras.	427
Cerisier de Virginie.	411
Orme d'Amérique.	357
Cèdre de Virginie.	238
Pin jaune.	333
Bouleau à feuilles de peuplier.	364
Châtaignier d'Amérique.	379
Peuplier d'Italie.	245

Le pouvoir calorifique du charbon varie entre les nombres 7000 et 7800, qui indiquent de combien de degrés il peut élever la température de son poids d'eau. Donc le carbone pur pourrait amener à l'ébullition 78,10 fois son poids d'eau liquide à zéro, et vaporiser 11,18 fois son poids de ce liquide. Théoriquement, il produirait 34 parties de plomb avec la litharge, mais le charbon ordinaire n'en donnant que 29 à 30, on prend pour pouvoir calorifique le nombre 7300.

La pratique nous apprend, 1° qu'à volumes égaux, les charbons de bois durs donnent plus de chaleur que les charbons de bois tendres, mais qu'à poids égaux, les effets calorifiques sont peu différents; 2° que les charbons sortis récemment des meules brûlent avec une plus grande facilité, mais chauffent moins que ceux qui ont séjourné pendant quelque temps sous les halles; 3° que le charbon obtenu par distillation est léger, brûle vite, mais que la température qu'il produit n'est pas si élevée qu'avec le charbon fabriqué en meules.

A poids égaux, le charbon a un pouvoir calorifique plus que double de celui du bois; il est moins grand à volumes égaux, mais la température développée par le charbon est toujours plus élevée.

Composition et pouvoirs calorifiques de quelques charbons.

	Charbon de Pont-Gibaut. — Sapin.	Pont-Gibaut. — Aulne.	Pont-Gibaut. — Bouleau.	Pont-Gibaut. — Chêne.	Choisy. — Charbon obtenu par distillation.	Charbon de bois de Bourdenne obtenu en vase clos.
Charbon.....	0.903	0.902	0.881	0.880	0.766	0.577
Cendres calcinées.....	0.022	0.018	0.019	0.020	0.064	0.008
Matières volatiles......	0.075	0.080	0.100	0.100	0.170	0.415
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Plomb produit	32.3	32.4	31.4	31.3	29.8	25.0

Charbons de Picardie, transportés par terre et pris sur le marché de Paris et de Choisy.

	Charbon d'épine.	Peuplier.	Érable.	Frêne.	Tremble.	Fusin.	Charbon de Choisy obtenu par distillation dans des cylindres.
Charbon.....	0.880	0.856	0.852	0.832	0.820	0.828	0.720
Cendres calcinées.....	0.024	0.010	0.010	0.018	0.030	0.016	0.066
Matières volatiles......	0.096	0.134	0.138	0.150	0.150	0.156	0.214
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Plomb produit	32.0	30.6	30.6	29.6	29.5	30.3	27.4

CARBONISATION DE LA HOUILLE.

Carbonisation en plein air. — On dispose des meules en forme de prismes triangulaires très-allongés, dans l'intérieur desquels on ménage des petites cheminées au moyen de moules en bois. Le feu se place à la partie supérieure et se propage dans toute la masse, de bas en haut. La durée de l'opération dépend de la nature de la houille et de l'état de l'atmosphère. A Saint-Etienne, cette opération dure de sept à quinze jours, qu'on peut ainsi décomposer : trois à quatre jours pour la combustion, trois jours et même huit à dix jours pour étouffer complètement. On donne à ces tas une largeur d'environ 2.m50 à 3.m80 (7 pieds 7 pouces à 11 pieds 7 pouces). Les cheminées maîtresses espacées entre elles de 1 mètre (3 pieds) ont 20 centimètres (7 pouces) de diamètre, et les ouvreaux de 30 à 40 centimètres (11 pouces à 1 pied 3 pouces) d'intervalle, ont 10 à 15 centimètres (3 pouces 9 lig. à 5 pouces 7 lig.) de diamètre.

Le rendement des houilles varie entre 40 et 50 p. 100 de coke.

La main-d'œuvre, à Saint-Etienne, se paie à l'entreprise à raison de 15 centimes les cent kilogrammes de coke, en fournissant les outils nécessaires pour ce genre de fabrication.

Généralement, on a renoncé à ce mode de fabrication à cause du déchet qui est d'au moins moitié, et il arrivait même que des coups de vent faisaient perdre des tas entiers. En outre, le coke est cuit beaucoup moins également, il est plus lourd, plus friable et brûle moins facilement que le coke des fours. La conduite de l'opération demande aussi beaucoup trop de soin. La main-d'œuvre y est par conséquent trop chère.

Aux mines de la Grand'Combes, on emploie une méthode mixte. Elle consiste à carboniser la houille sur des aires rectangulaires entourées de murs percés d'ouvreaux. La houille à carboniser est collante et menue; on l'humecte, et le tassement s'opère par couches successives entre trois murs comprenant un espace rectangulaire de 2 mètres (6 pieds) environ de largeur sur 3 mètres (9 pieds) de longueur et 1.m20 (3 pieds 8 p.) de hauteur. Les murs ont 0.m70 (2 pieds 2 pouces) d'épaisseur. Ils sont faits avec les grès houillers de la localité. Quand l'opération est terminée, on démonte la muraille antérieure, on arrache le coke avec des râbles et on l'arrose pour l'éteindre. Ces fours sont représentés par les figures 16 et 17, *Pl.* VIII.

Carbonisation dans des fours. — A Saint-Etienne, on emploie des fours de deux espèces :

1° *Fours anglais;*

2° *Fours français.*

Les fours anglais ont deux portes par lesquelles on charge et on décharge les fours.

Les fours français n'ont qu'une porte. L'enfournement a lieu par l'ouverture de la voûte. Ces fours diffèrent encore des premiers en ce que l'air arrive par une galerie qui débouche à l'extrémité et aux deux côtés de la tôle, tandis que dans les fours anglais, l'air ne s'introduit que par des yeux ménagés dans les deux portes. (Voir la construction de ces fours, *Pl.* VIII, *fig.* 18, 19 et 20.)

Dimensions prises sur 180 fours des fabriques de Saint-Etienne et de Rive-de-Gier.

ESPÈCES de FOURS.	NOMS des FABRIQUES.	SOLE. Longueur. — Mètres.	SOLE. Largeur. — Mètres.	Hauteur de la voûte. — Mètres.	Diamètre de la cheminée. — Mètres.
Fours anglais à sole rectangulaire dont les angles sont arrondis	Grand'-Croix..	5.50	2.60	1.30	0.40
	Le Canal.......	4.55	2.90	1.15	0.38
		Diamètre.			
Fours français à sole ronde.	Terre-Noire...	2.25		1.00	0.32
	La Bérardieri..	2.25		1.00	0.20
	Méons..........	2.45		1.00	0.24
	Saint-Genest..	2.60		1.00	0.32
	Côte-Thiohiri..	2.65		1.05	0.32

Les fours sont construits ordinairement en maçonnerie ordinaire de moellons jusqu'au niveau de la sole, laquelle est formée d'une rangée de briques posées de champ et à sec sur la maçonnerie inférieure par l'intermédiaire d'une couche de sable de 0.m04 (1 pouce 6 lignes). La voûte est construite en briques réfractaires.

La façon d'un four français à Saint-Etienne se paie 60 à 70 fr. Son prix total est d'environ 500 fr. La façon des fours anglais coûte 80 à 100 fr. pour les plus grands, leur prix est de 6 à 700 fr. La voûté est alors en briques réfractaires.

Les quantités de houille chargées dans les différents fours sont les suivantes :

Grand'-Croix. . .	3,000 kilog.	en	24 heures.
Le Canal. . . .	2,640.	. .	48
Terre-Noire. . .	1,130.	. .	24
Le Bérardieri. . .	1,800.	. .	72
Méons. . . .	1,725.	. .	48
Saint-Genest. . .	1,300.	. .	24
Côte Thiohiri. .	1,440.	. .	24

Les charges dépendent, comme on doit le penser, de la nature des houilles, mais on peut adopter les limites suivantes : pour les fours anglais d'environ 5.^{m}50 sur 2.^{m}60 (16 pieds 11 p. sur 8 pieds), 2.700 à 3.000 kilog. (5,516 à 6,129 liv.) de houille; pour les fours ronds de 2.^{m}75 (8 pieds 5 p.), 1,300 à 1,500 kil. (2,655 à 3,064 liv.); pour les fours ronds de 2^{m}25, (6 pieds 11 pouces), 800 à 1,000 kilog. (1,634 à 2,043 liv.), le tout en 24 heures. Pour 48 heures, les charges augmentent de moitié.

La houille est enfournée à la pelle et avec des rables qui l'étendent sur la sole. Le défournement a lieu avec des crochets.

Au Creusot, où la houille est carbonisée dans des fours anglais, le défournement se fait au moyen de crics qui se manœuvrent comme des vannes d'écluse. On introduit dans le four, quand la cuisson est terminée, un cadre en fer *a*, *b*, *c* (*Pl.* VIII, *fig.* 24) que l'on fixe au moyen de barres en fer *e*; *f*, *g* : ces tiges, réunies par des clavettes, s'attachent à une chaîne qui s'enroule sur un manège à tambour. Le cadre en fer pousse devant lui toute la fournée. Ce procédé offre une économie de temps sur la main-d'œuvre; ensuite le défournement se fait plus vite, ce qui empêche les fours de se refroidir. La figure 23 représente un de ces fours. La sole est inclinée d'environ 0.^{m}15 (5 pouces). Ils peuvent contenir 1,500 à 1,800 kil. (3,064 à 3,677 liv.) de houille, et rendent 50 à 55 p. 100.

FOURS A COKE DE L'USINE DE DECAZEVILLE.

Plan et coupe de ces appareils (fig. 27 et 28).

La porte (*fig.* 29) se compose d'un cadre en fer plat de 0.^{m}06 (2 pouces 3 lig.) de largeur et 0.^{m}012 (5 lig.) d'épaisseur environ, et garni de barres verticales de 0.^{m}06 (2 pouces 3 lig.) de largeur et 0.^{m}01 (5 lig.) d'épaisseur. Ces dernières barres sont prises à plat sur les premières. L'intérieur du cadre est rempli de briques réfractaires.

FOURS A UNE PORTE DE MAUBEUGE (*Pl.* VIII, *fig.* 30, 30 *bis* et 31).

Dimension de ces fours.

La sole est élevée à 0.^{m}70 (2 pieds 2 pouces) au-dessus du sol de l'usine. — Sa forme est elliptique.

Le grand axe a une longueur de 2.^{m} 96 sur 2.^{m}60 (9 pieds 1 pouce sur 8 pieds).

La sole est inclinée de 0.^{m}05 (1 pouce 10 lig.) vers la porte.

L'ouverture de la porte a 0.^{m}65 (2 pieds) de largeur, 0.^{m}40 (1 pied 2 p.) de hauteur sur les côtés et 0.^{m}50 (1 pied 6 p.) au milieu.

Les pieds-droits supportant la voûte ont 0.^{m}40 (1 pied 2 p.) de hauteur.

La voûte se compose de deux parties, l'une elliptique surbaissée et l'autre cylindrique.

Les conduits qui servent au passage de l'air pour aider à la carbonisation, ont intérieurement 0.^{m}06 (2 pouces 3 lig.) horizontalement, et 0.^{m}12 (4 pouces 5 lig.) dans le sens vertical.

Les ouvreaux qui conduisent l'air dans le four ont 0.^{m}025 (11 lignes) de largeur et 0.^{m}24 (8 pouces 11 lig.) de hauteur.

La section intérieure de la cheminée qui présente la forme d'un quarré, a 0.^{m}28 (10 pouces 4 lignes) de côté.

Ces fours sont au nombre de sept : dans chaque four, pour vingt-quatre heures, on charge 15 hectolitres de houille pesant l'un 87 kil. (177 livr.), soient ensemble 1305 kil. (2,665 liv.) qui rendent en moyenne 757 kilog. (1,546 liv.) ou 58 p. 100 de coke. On a essayé, par quarante-huit heures, des charges de 20 et 25 hectolitres, mais il n'y a pas avantage sous tous les rapports.

Nous allons donner les détails des frais de fabrication de coke dans sept fours à une porte, pendant un jour :

Deux journées d'ouvriers calcineurs à 1 f. 87 c.	3 f.	74 c.
0,40 journée de manœuvre pour surveiller l'extinction du coke, tamiser les cendres, etc., à 1 f. 50.	0	60
Entretien des outils par jour.	0	70
Intérêt à 5 p. 100 l'an de la valeur des sept fours estimés 700 f. l'un.	0	67
Entretien des sept fours pendant une journée à raison de 100 f. par an et par four. . .	1	97
Frais de bureau et de surveillance des travaux.	0	50
Total. . . .	8 f.	18 c.

La charge totale des sept fours est de 9,135 kilog. (18,663 liv.) de houille et de 5,299 kilog. (10,836 liv.) de coke produit. On a donc par 1,000 kilog. (2,043 liv.) des frais de fabrication qui sont exprimés par les sommes suivantes :

Main-d'œuvre.	0 f. 82
Entretien et frais généraux. . . .	0 72
Total.	1 f. 54

FOURS A COKE A DEUX PORTES ÉTABLIS DANS L'USINE DE MAUBEUGE (*fig.* 32, 33, 34, 35 et 36).

La largeur de la sole qui est inclinée est de 2.^{m}44 (7 pieds 5 p.) mesurée à la porte d'enfournement, et de 2.^{m}60 (8 pieds) à la porte de défournement.

Les pieds-droits ont 0.^{m}32 (11 pouces 10 lig.) de hauteur. La voûte recouvrant la sole a 0.^{m}43 (1 pied 4 p.) de flèche. Elle est circulaire.

Les conduits d'air ont 0.^{m}06 (2 pouces 3 lig.) de largeur sur 0.^{m}12 (4 pouces 5 lig.) de hauteur, et les ouvreaux 0.^{m}025 (11 lig.) de largeur sur 0.^{m}24 (8 pouces 11 lig.) de hauteur. Ils sont percés au travers des pieds-droits.

La section de la cheminée a 0.^{m}32 (11 pouces 10 lig.) de côté.

Les portes se soulèvent et s'abaissent au moyen de crics qui sont composés d'un pignon recevant le mouvement d'une double manivelle et faisant mouvoir une crémaillère. Ces crics sont fixés au moyen d'une plate-forme en fonte que traverse la crémaillère, et maintenus sur le four par deux tirants en fer.

Détails des frais de fabrication du coke pendant un jour, dans six fours à une porte et à défournement instantané.

Trois journées d'ouvriers calcineurs, à 1 f. 87 c.	5 f. 61 c.
0,50 journée de manœuvre pour enlever les cendres, etc.	0 75
Réparation de la maçonnerie ainsi que des garnitures des fours.	8 00
Intérêt à 5 p. 100 l'an pour six fours évalués 10000 f., y compris les outils.	1 37
Surveillance, frais de bureau à raison de 1,200 fr. par an.	0 90
Entretien des outils.	0 75
Total des frais pour une journée.	17 f. 38

La charge totale des six fours est de 14,094 kil. (28,794 liv.) de houille à raison de 27 hectolitres par four, 1 hectolitre pe-

sant 87 kilog. (177 liv.) Le produit en coke est représenté par 8,315 kilog. (16,987 liv.) à raison de 0,59 de houille employée. On peut donc reporter les frais de la manière suivante, sur 1,000 kilog. (2,043 liv.) de coke :

Main-d'œuvre.	0 f. 76
Entretien, intérêts de fonds, surveillance.	1 f. 33
Total.	2 f. 09

Si l'on compare ces résultats avec ceux observés pour les fours à une porte, on trouve que pour les fours à deux portes la diminution de la main-d'œuvre est plus que compensée. Mais dans ces espèces de fours on obtient un coke en plus gros morceaux, et par cela même un plus grand rendement.

On doit donc essayer ce mode de fabrication surtout quand la houille est à bas prix et que le combustible brûle facilement; mais il ne faudrait pas dépasser les dimensions que nous avons données pour ces appareils.

Résidus de la distillation de la houille.

Dans la distillation de la houille, on obtient plusieurs produits fixes ou gazeux; parmi les premiers se trouve le goudron, qui a plusieurs applications dans les arts.

Le gaz d'éclairage provient de la distillation de la houille; il contient, en proportions variables, de l'hydrogène carboné, du gaz oléfiant, de l'hydrogène pur, de l'oxide de carbone, de l'acide carbonique, de l'azote, de l'hydrogène sulfuré, des vapeurs huileuses et de l'ammoniac. Les houilles chauffées à 370° donnent beaucoup de goudron, mais peu de gaz éclairant; fortement chauffées, elles dégagent au contraire beaucoup de gaz, mais très-peu éclairant. La température la plus convenable pour obtenir le gaz le plus éclairant, est le rouge-cerise. Ce gaz, obtenu dans les usines, est purifié au moyen de la chaux avant de se rendre au gazomètre, d'où il se distribue dans tous les quartiers d'une ville.

Quand on distille du goudron de houille à une température graduée, on voit d'abord apparaître une huile limpide, légèrement colorée en jaune, qui contient beaucoup de *naphtaline*; puis une huile qui se solidifie à une température voisine de zéro, et qui renferme, à la fois, de la *naphtaline* et de la *paranaphtaline*, et si on continue l'opération, il se formera une huile jaune très-visqueuse, et enfin un résidu de charbon infusible.

Pour distiller le goudron, on se sert de l'appareil indiqué *Pl.* IX, *fig.* 19. Les gaz sortent par le tuyau *a b*, et se condensent

au moyen d'un système réfrigérant A. Il reste au fond du vase qui a servi à l'opération, une matière solide connue dans le commerce sous le nom de *brai gras* : il sert à enduire les bois et les murs, afin de les préserver de l'humidité. On l'a employé aussi dans la fabrication du mastic de bitume.

Ce mastic s'obtient en mêlant le brai gras encore chaud avec de la craie préalablement desséchée; on agite fortement avec une spatule et on le coule en pains de 40 kil. (81 livres) dans des moules (*fig.* 20). Ce mastic sert à la construction des terrasses, pourvu que leurs dimensions ne soient pas très-grandes, car les changements de température occasionnent des fissures. La chaussée du pont du Carrousel est recouverte de ce mastic qu'on a coulé sur le béton. Il a été encore avantageusement employé pour cimenter des constructions en briques, etc.

Dans l'usine royale de Gleiwitz, en Silésie, la carbonisation s'exécute dans des fours distillatoires qu'on a disposés de manière à recueillir le bitume qui brûle ordinairement en pure perte. Cette méthode convient bien dans les localités où les produits de la distillation ont de la valeur. La houille qu'on emploie en Silésie est peu collante, mais renferme une assez grande partie de bitume. Cette carbonisation se fait actuellement dans 6 fours, dans lesquels on charge à la fois 40 tonnes de houille, ce qui donne un produit de 58,867 tonnes de coke pour les 6 fours. On obtient, en outre, 58,033 litres de goudron brut. En comparant cette quantité au nombre de tonnes de houille, on trouve que l'hectolitre de houille a donné 3 litres,28 de goudron brut. Ce goudron est de nouveau distillé dans un vase fermé, et donne 4 p. 100 d'une huile limpide semblable au naphte.

Les fours sont en briques et composés d'un cylindre de 2 mètres (6 pieds) de hauteur, surmonté par une calotte sphérique, percée d'un trou cylindrique qui forme le gueulard. A la partie inférieure se trouve une porte en tôle pour le chargement et le déchargement, et quatre rangées de tuyaux en fonte qui servent à régler le tirage et à conduire l'opération. (Voir les *figures* 27, 28 et 29, *Pl.* IX.)

La sole est formée par l'extrados d'une voûte en briques percée de cinq trous servant également d'introduction de l'air. Le fourneau est relié par une armature en fer et en fonte. Le gueulard est fermé par une plaque de fonte qu'on lute, et les vapeurs s'échappent par un tuyau de fonte placé à la partie supérieure. La condensation du bitume s'opère dans un tuyau rectangulaire qui serpente dans un bassin rempli d'eau froide,

FABRICATION DU NOIR DE FUMÉE.

Pour obtenir le plus possible de noir de fumée, on ne doit carboniser que de petites quantités de houille présentant une grande surface. Les houilles sèches sont préférables aux houilles grasses. Pour cette fabrication, on emploie généralement des déchets de résine, des résidus de goudron, de houille et de bois, des résidus de caoutchouc, des huiles animales provenant de la calcination de matières animales.

La houille, pour 1000 parties, donne 33 de noir. Le noir est d'autant plus estimé qu'il est plus léger. Le noir connu dans le commerce sous le nom de noir de bougie, est le plus beau de tous ceux qu'on fabrique.

Le noir de fumée contient toujours du carbonate de chaux qu'on lui enlève par l'acide chlorhydrique, et de l'ulmine qu'on dissout dans la potasse.

On se sert de plusieurs appareils pour fabriquer le noir de fumée (*Pl.* IX, *fig.* 21). En A se trouve une chambre qui reçoit l'eau et la vapeur d'eau; le noir vient se déposer en B sur une toile métallique. La *figure* 22 présente une autre disposition de l'appareil.

En Angleterre, on dispose des sacs qui reçoivent différentes qualités de noirs (*fig.* 23).

Les *figures* 24, 25 et 26 indiquent un appareil de fabrication de noir de fumée employé à Saint-Etienne.

Ces fours ont 2.^{m}10 (6 pieds 5 p.) de diamètre sur 0.^{m}80 (2 pieds 5 p.) de hauteur de voûte; leur charge est d'environ 600 kil. (1,224 liv.) à carboniser en 24 heures.

La chambre de dépôts a 2.^{m}60 (8 pieds) de large, 5 mèt. (15 pieds 4 p.) de haut sur 13 mèt. (40 pieds) de long. Elle est voûtée et porte à son extrémité une petite cheminée de 0.^{m}11 (4 pouces) de côté. Chaque chambre coûte environ 700 fr.

LIGNITES.

Parmi les lignites, on distingue : 1° le *bois fossile;* 2° le *bois bitumineux;* 3° le *lignite commun*, et 4° le *lignite terreux*. Ces combustibles se rencontrent dans les terrains de formation postérieure à la craie; dans l'argile plastique et dans les calcaires d'eau douce.

Lignites communs. — Les lignites communs ressemblent beaucoup aux houilles des terrains secondaires. Ils sont noirs ou bruns, compacts. Quand leur cassure est conchoïde et luisante, ils prennent souvent le nom de *jayet;* mais le véritable jayet qu'on travaille dans la bijouterie n'est pas un lignite.

A la distillation, ils donnent du gaz inflammable, de l'eau et des huiles. Ils brûlent avec une flamme longue.

Composition de quelques lignites.

	Utweiller. (Rive droite du Rhin.)	Allemagne.	Edou. — (Charente.)	Saint-Lot. (Basses-Pyrénées.)	l'Enfant-Dort (Bouches-du-Rhône.)	Minerve. — (Aude.)	Dauphin. (Basses-Alpes.)
Charbon....	0.673	0.429	0.390	0.484	0.493	0.326	0.436
Cendres	0.009	0.046	0.110	0.056	0.039	0.100	0.074
Matières volatiles.....	0.318	0.525	0.500	0.460	0.468	0.574	0.490
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Bois bitumineux.—Ce combustible a conservé la contexture du bois, mais sa couleur est le brun ou le noir plus ou moins foncé.

A la distillation, le bois bitumineux donne de l'eau acide et des huiles plus ou moins foncées. Chauffé, il décrépite légèrement et brûle avec une longue flamme jaune dont l'odeur est très-désagréable. Un échantillon a donné à l'analyse :

Charbon.	0,441
Cendres.	0,014
Matières liquides.	0,371
Gaz.	0,174

Lignites terreux. — Ces combustibles sont mélangés d'une grande quantité de matières étrangères. Ils contiennent beaucoup de pyrites ; dans ce cas, on les exploite comme minerais de couperose et d'alun. Ils servent aussi comme engrais après avoir été brûlés.

Analyse de quelques lignites terreux.

	Allemagne.	Chantilly (Seine-et-Oise.)	Menat. (Puy-de-Dôme.)	Bouxwiller. (Bas-Rhin.)	Reims. — (Marne.)
Matières combustibles....	0.825	0.803	0.650	0.440	0.110
Argile et sable	0.175	0.066	0.350	0.440	0.860
Pyrite.........	»	0.131	»	0.120	0.030
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ANTHRACITE.

L'anthracite est essentiellement composé de carbone; aussi ne donne-t-il que traces d'huile à la distillation. Il renferme, indépendamment de l'eau, une petite quantité de matières volatiles.

Le pouvoir calorifique de l'anthracite est sensiblement le même que celui du coke, et développe une température excessivement élevée. Depuis quelques années, en Angleterre, on emploie ce combustible dans les hauts fourneaux, et les résultats qu'on a obtenus sont satisfaisants. En Amérique, l'anthracite est beaucoup employé pour le chauffage domestique. On s'en sert aussi avec succès sous les chaudières, et on l'a substitué au bois sur les bateaux à vapeur.

Ce combustible n'est exploité qu'en Pensylvanie, dans les montagnes comprises entre le Susquehannah et la Delaware.

On distingue trois sortes d'anthracite : 1° *anthracite vitreux*; 2° *anthracite commun*; et 3° le *graphite* ou *plombagine*.

Anthracite vitreux.

Sa pesanteur spécifique est 1,60. On connaît deux gisements considérables, situés l'un à Lamure, près de Grenoble, et l'autre aux États-Unis d'Amérique.

Anthracite commun.

Il est ordinairement lamellaire ou écailleux, dur, tachant très-peu les doigts et se réduisant facilement en poudre impalpable sous le pilon.

Graphite ou plombagine.

Il offre des caractères particuliers, et généralement on ne le classe pas avec l'anthracite. Il ne paraît pas devoir son origine aux matières végétales, et on le rencontre fréquemment dans des roches primordiales. Il est gris de fer, jouissant de l'éclat métallique. Sa pesanteur spécifique est représentée par 2,08 ou 2,26. On l'emploie pour faire des crayons et pour atténuer la résistance des frottements dans les machines. Il brûle plus difficilement encore que l'anthracite.

Composition de quelques anthracites.

	Lamure, près de Grenoble.	Pensylvanie.	Binic.	Laval. Chaumière.	Laval. Baconinère.	Corbassière, en Savoie.
Charbon	0.913	0.860	0.850	0.847	0.665	0.770
Cendres	0.027	0.060	0.040	0.073	0.250	0.150
Matières volatiles	0.060	0 080	0.110	0.080	0.085	0.080
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Plomb avec litharge	31.6	50.5	»	33.0	26.6	26.7

	Mussy-et-Dun (Saône-et-Loire.)	Mont-de-Lans (Isère.)	Ernsi. (Espagne.)	Graphite de Chardounet. (Isère.)	Graphite de Bavière.	Graphite de Borrowdale. (Angleterre.)
Charbon	0.767	0.733	0.700	0.734	0.868	»
Cendres	0.148	0.132	0.240	0.220	0.110	»
Matières volatiles	0.085	0.135	0.060	0.046	0.022	0.035
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Plomb avec litharge	29.0	25.0	»	26.6	29.8	»

TOURBES.

Les tourbes sont les produits de la décomposition des matières ligneuses à la surface du sol. Cette décomposition s'opère sous nos yeux.

La tourbe est plus ou moins impure, suivant les localités; elle peut contenir de la terre et des produits décomposés; on doit donc choisir les tourbes qui contiennent le moins d'impuretés. La tourbe est presque entièrement composée d'ulmate de chaux qui, s'il était pur, donnerait plus de chaleur que le bois. Quand la tourbe est ancienne, elle est plus compacte et contient plus d'ulmine.

Dans les tourbières, on rencontre à peu près toutes les qualités. On a employé divers procédés pour rendre la tourbe compacte : un des meilleurs moyens consiste à la laisser à l'air quand on l'a disposée en meules.

Pour la faire dessécher, on trace des petits canaux dans le sens de la longueur et de la largeur. Une amélioration récente consiste à diminuer le volume de la tourbe et d'opérer le desséchement dans des fours dont la température s'élève de 80 à 100°. C'est la meilleure de toutes les tourbes.

A poids égaux, la tourbe donne à peu près la même chaleur que le bois; elle contient beaucoup plus de matières nuisibles à la combustion que le combustible avec lequel nous la faisons entrer en comparaison. On trouve jusqu'à 50 et 60 p. 100 de matières terreuses. Chauffée en vase clos, la tourbe donne à peu près les mêmes produits que le bois : de l'eau, de l'acide acétique, de l'acide carbonique, des carbures d'hydrogène, du carbone, de l'ulmine qui se prend en masse, et finalement du goudron et des huiles essentielles. Ces matières répandent une odeur très-désagréable, c'est pour cette raison qu'on a exclu ce combustible du chauffage domestique, mais on peut le brûler dans des calorifères.

Carbonisation de la tourbe. — La tourbe réduite à l'état de charbon peut s'employer à tous les usages, et le seul inconvénient qu'elle présente alors, est la grande quantité de cendres qu'elle laisse après la combustion.

Le charbon de tourbe brûle facilement et lentement, en produisant une flamme légère sans fumée. — Ce combustible peut être employé avec avantage dans les fourneaux de cuisine, et pour les évaporations; mais le prix de fabrication en est trop élevé pour en répandre l'emploi. — Cette carbonisation se fait en vase clos.

Le pouvoir calorifique du meilleur charbon de tourbe est toujours un peu moindre que celui du charbon de bois, et généralement il n'équivaut qu'aux deux tiers ou aux trois-quarts.

Le charbon de tourbe pèse généralement plus que le bois.
Celui de Framont, qui est très-dur, pèse 250 kil. le mèt. cube.
Id. Voitsumra, dans le Fichtelgebirge 230 *idem.*
Id. Crouy-sur-Ourcq . . . . 310 *idem.*
Id. Essonne (Seine-et-Oise), pèse 47 kilog. le 1/4 hectolitre comble.

Composition de quelques charbons de tourbe.

	CROUY-SUR-OURCQ.	HAM.	ESSONNE.	FRAMONT.
Charbon....	0.430	0.495	0.516	0.672
Cendres calcinées.....	0.320	0.285	0.260	0.108
Matières volatiles.....	0.250	0.220	0.224	0.220
	1.000	1.000	1.000	1.000
Plomb avec litharge..	17.7	18.8	22.4	26.0

§ 14. — BORE.

Ce corps est très-peu répandu. Il a été découvert dans une combinaison qui se rencontre dans quelques petits lacs de la Toscane et de la Sicile. Sa couleur est brune ; il est insoluble dans l'eau, insipide, inodore, fixe et réfractaire comme le carbone.

Préparation. — On introduit par couches horizontales, dans un tube fermé, du potassium et de l'acide borique, et on chauffe légèrement. On obtient du borate de potasse et du bore. — On lave ; le borate de potasse étant soluble dans l'eau, le bore se dépose sous la forme d'une matière pulvérulente.

§ 15. — SILICIUM.

Ce corps est très-répandu dans la nature, et entre pour 0,48 en poids dans la silice ou acide silicique que l'on rencontre dans presque toutes les gangues de minerais, et qui constitue, avec l'alumine, la terre et les argiles.

Propriétés physiques. — Le silicium est une poudre grisâtre, insipide, inodore, insoluble dans l'eau, réfractaire et fixe, brûlant très-difficilement dans l'oxigène, à cause de la couche de silice qui le recouvre.

Propriétés chimiques. — Le silicium est inattaquable par les acides, à l'exception de l'acide fluorhydrique, mais il est facilement attaqué par les bases alcalines hydratées. On n'est pas d'accord sur le poids de l'équivalent du silicium.

Les chimistes, qui admettent pour formule de l'acide sili-

cique SiO, donnent pour équivalent au silicium 92.gr.44, et ceux qui choisissent la formule SiO^3 représentent l'équivalent du silicium par 277.gr.32.

MÉLANGES ET COMBINAISONS DES MÉTALLOÏDES.

§ 16. — AIR ATMOSPHÉRIQUE.

L'air atmosphérique est un gaz transparent, invisible en petite masse, d'une couleur azurée quand il est pris en grande quantité. Sa pesanteur spécifique est prise pour unité pour tous les autres gaz et les vapeurs.

Les dernières recherches de MM. Dumas et Boussingault ont donné, pour la composition de l'air, 20,80 d'oxigène et 79,20 d'azote. Il contient en outre une faible quantité d'acide carbonique et de vapeur d'eau.

L'air n'est qu'un mélange des deux gaz oxigène et azote, et non une combinaison.

Analyse de l'air.—Lavoisier a employé la méthode suivante : au col d'un ballon A (*Pl.* VII, *fig.* 26), se trouve soudé un tube de verre trois fois recourbé à angles droits, et qui se relève jusqu'au haut d'une cloche graduée B. Après avoir jaugé ce ballon, on y introduit un volume connu de mercure, et en excès, relativement à l'oxigène de l'air que l'on veut analyser. On plonge l'extrémité du tube dans le mercure, on le recouvre de la cloche graduée, et, à l'aide d'un siphon, on enlève une portion de l'air. Le volume total de l'air employé est connu au moyen de la cloche. On tient alors le mercure pendant plusieurs jours à la température à laquelle commence son ébullition ; on arrête l'opération et on laisse refroidir ; on recommence pour laisser refroidir de nouveau ; on remarque alors que tout l'oxigène a été absorbé d'une quantité égale à celle indiquée par le nombre de divisions dont le mercure s'est élevé au-dessus de son niveau primitif.

L'analyse de l'air pris dans des circonstances particulières donne des résultats différents. M. Dumas a trouvé que l'air de Paris, pris au jardin des Plantes, contient, sur 1000 parties, 230 d'oxigène et 770 d'azote. Il renferme d'ailleurs 0,0004 de son volume d'acide carbonique. L'air pris en pleine mer contient, sur 1000 parties, 224 d'oxigène et 776 d'azote.

§ 17. — EAU.

Considérée en petite quantité, l'eau est insipide, inodore et incolore ; mais prise en grande masse, elle présente une couleur verdâtre. Sa densité sert d'unité pour mesurer celle

de tous les corps solides et liquides. Le poids d'un centimètre cube d'eau distillée, et à la température de 4° 108 du thermomètre centigrade, forme l'unité de poids adoptée, qui est le gramme.

Propriétés physiques et chimiques de l'eau. — L'eau prise à 0° étant chauffée, se contracte d'abord jusqu'à 4°108, ensuite elle se dilate et entre en ébullition à 100°, sous la pression normale de o.m76.

La présence de sels dans l'eau peut retarder beaucoup son point de congellation. Cette propriété est mise à profit pour concentrer les dissolutions. Les sels qui abaissent la température de la congélation de l'eau élèvent aussi celle de son ébullition, ainsi qu'on peut voir par le tableau suivant :

DISSOLUTION DES SELS dans 100 parties d'eau.	TEMPÉRATURE de l'ébullition.
41.2 de chlorure de sodium.....	108°.6
48.5 de carbonate de soude.....	104. 83
335.1 d'azotate de potasse........	116. 7
205.0 de carbonate de potasse...	135. 2
798.2 d'acétate de potasse.........	169. 2
325.0 de chlorure de calcium.....	179. 7

Composition de l'eau. — L'eau est composée d'hydrogène et d'oxigène, ainsi qu'on peut le reconnaître en brûlant de l'hydrogène bien sec au-dessous d'une cloche de verre. L'analyse de l'eau se fait au moyen de la pile, l'hydrogène se rend au pôle négatif, et l'oxigène au pôle positif. Il est convenable de rendre l'eau conductrice de l'électricité en ajoutant un peu de sel marin ou de sulfate de soude, ou bien encore de l'acide sulfurique ou azotique. Cette analyse n'est jamais bien exacte à cause de la solubilité de deux gaz dans l'eau. MM. Dulong et Berzélius ont analysé l'eau au moyen de l'oxide de cuivre CuO. On fait arriver un courant d'hydrogène bien pur et bien sec dans un tube renfermant de l'oxide de cuivre qu'on a eu soin de peser avant l'opération. L'oxigène de l'oxide s'unit avec l'hydrogène qu'on dégage, et forme de l'eau à l'état de vapeur, qu'on arrête dans un autre tube avec de l'acide

sulfurique. On pèse de nouveau quand l'opération est terminée, et on connaît alors la quantité d'oxigène enlevée à l'oxide, d'où l'on peut déduire la loi de composition de l'eau.

La densité de la vapeur d'eau à la température de 0°, et sous la pression de 0,76, est égale à 0,625.

Eaux naturelles. — L'eau n'est pure qu'autant qu'elle a été distillée, et dans la nature on rencontre des eaux qui sont à cet état, telle est celle qui provient de la fonte des neiges : elle est formée par l'évaporation des eaux de pluies. L'eau pluviale est assez pure, celle des glaciers ne contient souvent que $^{1}/_{10000}$ d'impuretés, quantité pour ainsi dire inappréciable. Quand on veut recueillir les eaux de pluie, il faut avoir soin de les faire écouler sur un toit bien entretenu. Les toits en ardoises sont peu convenables, à cause du sulfure de fer qu'elles contiennent et qui, au contact de l'air, se change en sulfite. Un toit en tuiles donne une eau plus pure ; mais l'eau se charge toujours des matières organiques contenues dans l'atmosphère, puis encore de carbonate de chaux, de sulfate de chaux, et même de chlorure de sodium. Le carbonate est dissous à la faveur de l'excès d'acide carbonique.

L'eau distillée et non aérée est fade, lourde et malsaine; ainsi, à de très-grandes hauteurs, où la solubilité de l'air diminue avec la pression, l'eau devient quelquefois presque impotable. L'eau qui contient du sulfate de chaux n'est pas potable, mais on peut l'employer dans les usines à certaines préparations. Les eaux chargées de carbonate de chaux peuvent se boire, mais elles sont impropres à certaines fabrications, car ce sel agissant sur toutes les couleurs, se combine avec les laines et forme un savon insoluble; en outre, les eaux calcaires, par un effet galvanique, déposent leur sel dans les tuyaux de conduite. C'est ainsi qu'à Sèvres les tuyaux s'obstruent tous les dix ans, et on est obligé de faire passer un courant d'acide chlorhydrique qui dissout le carbonate de chaux. Dans les chaudières qu'on emploie pour distiller ou vaporiser l'eau, il se forme un dépôt de matières étrangères (sulfates et carbonates) qui s'attachent tellement aux parois du vase qu'il est impossible de l'en détacher. Ce phénomène a le grave inconvénient d'exposer la chaudière à rougir, et par conséquent à se détériorer très-promptement. (*Annales des mines.— Dépôts dans les chaudières.*) En outre, ce dépôt empêchant la paroi d'être mouillée, celle-ci peut rougir, et si la couche hétérogène qui la recouvre vient alors à se fendiller, l'eau se trouvant au contact

d'un corps incandescent fournit une masse très-considérable de vapeur qui peut déterminer l'explosion. En introduisant dans la chaudière des pommes de terre râpées, on empêchait le dépôt de prendre de la consistance. Ce moyen n'était pas toujours efficace. L'argile délayée dans l'eau agit avec plus d'énergie; mais M. Dumas indique un moyen plus sûr encore : il consiste à introduire dans la chaudière une certaine quantité de carbonate de soude. On emploie aussi avec succès les résidus de bois de teinture.

L'eau qui renferme du bi-carbonate de chaux peut se purifier par une légère ébullition, ou même en l'exposant assez longtemps au contact de l'air. L'eau de chaux jouit aussi de la propriété de purifier ces eaux : en ajoutant ce réactif, il y aura formation d'un carbonate neutre qui est insoluble et qui se déposera.

On rencontre aussi dans la nature de l'eau chargée de carbonate de fer; le fer, ici, se trouve encore dissous à la faveur de l'acide carbonique.

Les eaux chargées de sulfate de chaux se purifient au moyen du carbonate de soude qui convertit le sel en sulfate de soude soluble.

Purification des eaux douces.

Les eaux douces se trouvent souillées soit par des corps gazeux qui se trouvent en dissolution, soit par des matières en poudre très-fine. Quand les matières sont en simple dissolution, on emploie le charbon, qui a la propriété d'absorber les corps gazeux en dissolution et les matières colorantes. Avec un seizième de son poids de charbon animal, l'eau la plus impure peut redevenir inodore et incolore, mais non pas insipide ; car il existe encore des corps étrangers que le charbon ne peut entraîner. Le charbon a l'inconvénient grave d'enlever tout l'air à l'eau; ainsi, pour l'eau potable, il ne faut jamais avoir recours à ce moyen de purification, on doit la filtrer sur du sable. L'alun est aussi employé; par kilogramme d'eau on ajoute 2 grammes d'alun. Cette valeur est un *maximum :* pour les eaux de Seine un dixième suffit. Ici l'alun est décomposé, le carbonate de chaux est changé en sulfate d'alumine, et l'alumine de l'alun est précipitée. En essayant les deux méthodes précédentes, on a reconnu que l'alun agissait plutôt par son excès d'acide que par lui-même; ainsi, si par litre d'eau on ajoute à du charbon animal 10 gouttes d'acide sulfurique, on obtient de meilleurs résultats; dans ce cas,

l'acide sulfurique ne peut apporter à l'eau des propriétés nuisibles, parce qu'alors il est neutralisé.

L'eau des rivières contient beaucoup de terre végétale et autres matières dont on se débarrasse par des moyens mécaniques. On a recours, dans ce cas, à des filtres en pierre, ou en sable. Dans les usines où l'eau de lavage des minerais doit se rendre à une rivière, on doit la faire passer par des digues filtrantes, en maçonnerie ou plutôt en fascines.

EAUX MINÉRALES.

Le caractère principal de ces eaux consiste en ce qu'elles ne sont pas potables; elles contiennent en dissolution des substances qui ne se rencontrent pas à la surface du sol. Il en est qui surgissent des terrains primitifs quelquefois bouillantes. Toutes les eaux chaudes contiennent de l'hydrogène sulfuré, des hydrosulfates et des carbonates.

Sous le point de vue économique, on divise ces eaux en trois classes :

1° Eaux gazeuses qui ne contiennent que de l'acide carbonique, telles que les eaux de Seltz.

2° Celles qui sont purement salines, et qui renferment des bi-carbonates, telles que les eaux de Vichy.

3° Les eaux ferrugineuses contenant du carbonate de fer et quelquefois aussi du sulfate de fer, comme les eaux de Passy.

4° Celles qui contiennent de l'hydrogène sulfuré et des hydrosulfates, comme les eaux d'Enghein et de Barèges.

Imitation de ces eaux.

Le cas le plus simple est celui où il s'agit d'imiter les eaux salines; dans ce cas, il faut faire l'analyse et mettre les sels dans les proportions trouvées; mais on ne peut jamais les imiter parfaitement, parce que ces eaux contiennent des substances inconnues et qui échappent à l'analyse. Il n'y a que les eaux de Sedlitz qu'on puisse parfaitement contrefaire.

Pour obtenir une eau ferrugineuse, on introduit dans une bouteille d'eau de Seltz, un morceau de fil de fer : l'oxigène de l'air contenu dans le vase se porte sur le fer, et l'acide carbonique forme du carbonate de fer qui se dissout dans le reste de l'acide.

Pour imiter les eaux de Spa, on doit ajouter un centième du volume de l'eau d'hydrogène sulfuré, qui empêche la peroxidation du fer; mais la différence est encore grande dans les eaux naturelles et celles artificielles : les premières sont en

même temps toniques et calmantes, tandis que les dernières sont toniques, mais irritantes.

Les eaux qui renferment des hydrosulfates s'obtiennent en dissolvant dans l'eau du bi-hydrosulfate de soude.

Eaux de Seltz.

L'imitation des eaux de Seltz n'est pas absolue : il faudrait ajouter une certaine quantité de matière saline. C'est à Tivoli que l'on a commencé à imiter les eaux de Seltz. En tout temps, on a construit une pompe foulante et aspirante destinée à aspirer l'acide carbonique produit, et à le fouler dans un réservoir ; mais le bouchage des bouteilles était très-difficile. Maintenant, on laisse l'eau chargée jusqu'à huit fois son volume d'acide carbonique pendant douze ou vingt-quatre heures. Il paraît que le repos favorise une plus grande division ; par ce moyen l'on a au moins une demi-minute pendant laquelle on peut boucher la bouteille.

Il existe actuellement trois moyens de fabrication ; le plus mauvais consiste à faire arriver dans la bouteille même, 8 volumes d'acide carbonique dans un volume d'eau. La deuxième méthode a pour but de faire arriver l'acide carbonique dans de l'eau contenue dans des réservoirs en cuivre étamé par le procédé polychrôme (étamage composé d'étain où il entre un huitième de son poids de fer-blanc). La troisième méthode réunit les deux circonstances : on fait arriver l'acide carbonique dans des réservoirs en forme de fuseaux, la pression est exercée par l'acide carbonique lui-même ; on fait ensuite passer neuf fois le volume de l'eau contenu dans le réservoir, et on laisse déposer pendant vingt-quatre heures. L'acide carbonique doit être très-pur, car la plus petite quantité d'air empêche la dissolution de s'opérer. On doit employer l'acide carbonique dégagé des carbonates par un acide, l'acide sulfurique par exemple, qu'on fait réagir sur de la craie réduite en poudre très-fine. Le vase dans lequel on prépare l'acide carbonique est une sphère creuse en plomb ; on peut aussi se servir d'un appareil de Woolf. Pour la conservation de l'eau de Seltz on doit avoir soin de rejeter les bouteilles d'épaisseur inégale.

Purification de l'eau.

Quand on veut recueillir une faible quantité d'eau pure, on fait usage de l'appareil suivant (*Pl.* VII, *fig.* 27) :

A est une cornue dans laquelle s'opère la distillation. L'eau en vapeurs se rend dans le ballon B bi-tubulé, qu'on entoure

d'un mélange réfrigérant pour aider à la condensation. L'eau contenant de l'air en dissolution, de l'acide carbonique, de l'ammoniac et des sels ammoniacaux, on ne doit pas arrêter les premières parties du dégagement de vapeur.

Pour condenser plus énergiquement la vapeur, M. Gay-Lussac a proposé l'appareil suivant (*fig.* 28) :

L'eau à distiller est placée en A ; au moyen du long tube CD, elle se rend dans le vase B en traversant le manchon M, où il se produit un courant d'eau froide en sens contraire du mouvement de la vapeur d'eau. Ce courant est alimenté par un jet continu R qui, descendant par le tube V, remplit le vase T, remonte en M et se déverse en X.

Pour distiller l'eau en grand, et en général tous les liquides, on se sert de l'appareil connu sous le nom d'*alambic*.

HYDRACIDES.

CLASSIFICATION DES HYDRACIDES.

Les hydracides, au nombre de sept, se divisent en deux classes.

Acides de la première classe.

Acide chlorhydrique.	H Ch.
Acide iodhydrique.	H Jo.
Acide brômhydrique.	H Br.
Acide fluorhydrique.	H Fl.

Dans cette classe, le volume de l'équivalent de chaque acide est égal à 4, en prenant pour unité de volume celui d'un équivalent d'oxigène.

Acides de la seconde classe.

Acide sulfhydrique.	HS.
Acide sélenhydrique.	HSe.
Acide tellurhydrique.	HTe.

Cette classe comprend des acides dont l'équivalent n'a qu'un volume égal à deux.

Première Classe.

§ 18. — ACIDE CHLORHYDRIQUE.

Cet acide est connu dans le commerce sous le nom d'*acide muriatique*, d'*esprit de sel*. C'est alors une dissolution dans l'eau de ce gaz, incolore et répandant à l'air d'épaisses fumées blanches. Sa densité est de 1,2547. Ce gaz peut se liquéfier sous la pression ordinaire et par un froid de 40°. L'eau

en dissout 464 fois son volume, ou environ les 0,75 de son poids, sous la pression ordinaire et à la température de 20°.

L'acide chlorhydrique est formé d'un volume d'hydrogène et d'un volume de chlore; il sera composé en poids de :

0,0688 = 1 volume d'hydrogène.
2,4406 = 1 volume de chlore.

donc : 2,5094 = 1 volume d'acide chlorhydrique.

Pour obtenir l'équivalent en poids du chlore, on déterminera la quantité de chlore qui s'unit à l'équivalent en poids de l'hydrogène pour former de l'acide chlorhydrique. 12,48 représentant l'équivalent de l'hydrogène, on posera la proportion :

$$0,0688 : 2,4406 :: 12,48 : x.$$

d'où : $x = 442,65$ = l'équivalent du chlore.

Pour l'équivalent de l'acide chlorhydrique, il est :

$$12,48 + 442,65 = 455,13.$$

Préparation de l'acide chlorhydrique. — Dans les laboratoires de chimie, on prépare l'acide chlorhydrique au moyen de l'acide sulfurique, qu'on fait réagir sur du chlorure de sodium NaCh, dans l'appareil suivant (*Pl.* VIII, *fig.* 1). En A, on met l'acide sulfurique et le chlorure de sodium; et, pour concentrer davantage la dissolution, on fait passer le gaz dans une série de flacons de Woolf, entourés de neige ou de glace pilée. La réaction s'opère à la température ordinaire; mais elle devient beaucoup plus énergique à 300°. Voici le résultat de l'opération exprimé en équivalents chimiques:

$$NaCh + So^3\,HO = HCh + NaO.\,SO^3.$$

Fabrication de l'acide chlorhydrique du commerce. — Cet acide se prépare dans des cylindres en fonte de 60 centimètres (1 pied 10 p.) de diamètre, dans lesquels on introduit 160 kil. (327 liv.) de sel pour 80 kil. (163 liv.) d'acide sulfurique. On chauffe au rouge obscur, en ayant soin de répartir, aussi également que possible, la température sur les cylindres. L'acide chlorhydrique se rend dans des bombonnes *a*, *b*, *c* en grès, où la concentration s'opère. (Voir *fig.* 2, 3 et 4.) Ces vases peuvent contenir jusqu'à 100 litres. Le cylindre est fermé par un tampon conique, qu'on lute avec de la terre glaise. L'acide sulfurique s'introduit au moyen d'un entonnoir en grès M, qui s'adapte sur la fermeture du cylindre.

Le sulfate de soude qui provient de cette opération sert à la fabrication de la soude. On l'emploie dans les verreries, pour remplacer la soude ; mais il attaque les creusets dans lesquels on opère. Le sulfate de soude est encore employé pour l'épuration des eaux des salpêtriers et des eaux-mères, dans la fabrication du sel marin. A l'état brut, le sulfate de soude sert au chauffage des grains : pour cela, on fait dissoudre 8 kil. (16 liv. 5 onc.) de ce sel dans 100 kil. (204 liv.) d'eau; on immerge les grains et on les place en tas, après les avoir mêlés avec de la chaux, dans la proportion de 2 kil. (4 liv.) par hectolitre de grains.

L'acide chlorhydrique se vend 13 à 14 francs les 100 kil.

§ 19. — ACIDE BROMHYDRIQUE.

C'est un gaz incolore, d'une saveur et d'une odeur piquantes. Sa densité est 2,731, et la densité de l'eau saturée par cet acide est 1,3. Ce gaz est composé de un demi-volume de vapeur de brôme ; donc :

1 volume d'hydrogène, ou. . . . 0,0688
et 1 volume de brôme, ou. 5,3933

donnent 2 volumes d'acide brômhydrique, 5,4621.

Pour connaître les quantités de brôme et d'hydrogène qui entrent dans 100 parties d'acide brômhydrique, on pose la proportion :

$$5{,}4621 : 5{,}3933 :: 100 : B = 98{,}74$$
$$5{,}4621 : 0{,}0688 :: 100 : H = 1{,}26$$

D'après ces chiffres, on peut déterminer l'équivalent du brôme :

$$1{,}26 : 98{,}74 :: 12{,}48 : x = 978{,}30.$$

Par suite, l'équivalent d'acide brômhydrique sera :

$$978{,}30 + 12{,}48 = 990{,}78.$$

Préparation. — On fait réagir le brôme sur le phosphore, en présence d'un peu d'eau. Voici le résultat de l'opération :

$$Ph + 3Br + 3Ho = 3BrH + PhO^3.$$

Cette opération se fait dans un tube recourbé (*fig.* 5) ; en A on met du brôme et du verre pilé, et en B du phosphore et du verre pilé, humecté d'eau ; on chauffe en A, et on recueille les gaz sous une cloche à mercure.

§ 20. — ACIDE IODHYDRIQUE.

Cet acide a les mêmes propriétés que les gaz dont nous venons de parler; mais ce dernier a pour l'hydrogène une affinité encore moins grande que le brôme. Sa densité est exprimée par 4,443. La densité de l'eau chargée d'acide iodhydrique est 1,07, et bout à 108°.

L'acide iodhydrique, sur 100 parties, contient :

Hydrogène.	0,78
Iode.	99,22.

La proportion suivante nous donnera l'équivalent de l'iode:

$$0,78 : 99,22 :: 12,48 : x = 1578,98$$

et, par suite, l'équivalent de l'acide iodhydrique sera :

$$1578,98 + 12,48 = 1591,46.$$

Préparation. — M. Gay-Lussac prépare ce gaz en introduisant dans un tube fermé à l'une de ses extrémités, des couches alternatives d'iode, de verre pilé humide et du phosphore. En chauffant légèrement, le gaz se dégage.

§ 21. — ACIDE FLUORHYDRIQUE.

L'acide fluorhydrique est un liquide jouissant d'une très-grande fluidité. Il se dissout dans l'eau en toutes proportions.

Cet acide concentré est un corps des plus corrosifs ; il détruit le tissu animal avec beaucoup d'énergie, et sa présence sur la peau produit la même impression qu'une brûlure. La densité de cet acide n'a pu être déterminée, ainsi que son point d'ébullition; cependant on sait que cette température est inférieure à + 30°.

Sur 100 parties d'acide fluorhydrique, il entre 5,067 d'hydrogène, et par suite 94,933 de fluor; d'où l'équivalent du fluor est égal à 233, 44, et celui de l'acide fluorhydrique :

$$233,44 + 12,48 = 245,92.$$

Préparation. — On l'obtient en faisant réagir l'acide sulfurique concentré sur du fluorure de calcium, ou *spath-fluor* des minéralogistes. Cette opération se fait dans des vases de plomb, parce que nous avons déjà vu que le fluor attaquait le verre. On introduit dans une cornue (*fig.* 6); faite de deux pièces A, B, un mélange composé d'une partie de fluorure de calcium bien pulvérisé et trois parties et demie d'acide sulfurique concentré. On adapte à la cornue un récipient R, qui plonge dans un vase renfermant de la glace. On chauffe jus-

qu'à 140°; l'acide fluorhydrique se dégage et va se condenser en R. L'acide se conserve dans des bouteilles en plomb.

Usages. — On se sert de l'acide fluorhydrique pour graver sur verre. On étend sur la plaque de verre une couche de vernis, composé de trois parties de cire et d'une partie d'huile de térébenthine; avec un burin on grave le dessin qu'on veut obtenir; puis on expose la plaque à la vapeur de l'acide, qu'on produit avec une partie de fluorure de calcium et deux parties d'acide sulfurique, chauffées légèrement dans une boîte de plomb.

Deuxième Classe.

§ 22. — ACIDE SULFHYDRIQUE.

Cet acide porte aussi le nom d'acide hydrosulfurique, et d'hydrogène sulfuré plus souvent encore.

L'acide sulfhydrique est un gaz incolore, d'une odeur fétide, analogue à celle des choux pourris. Il est très-vénéneux: un oiseau ne peut vivre dans un air qui en renferme seulement $^1/_{1500}$ de son volume, un chien $^1/_{800}$, et un cheval dans $^1/_{200}$.

La densité de ce gaz est 1,1912. — Il est susceptible de se liquéfier sous la pression de 18 atmosphères et donne naissance à un liquide très-fluide dont la densité est 0,9.

L'hydrogène sulfuré est impropre à la combustion; mais il est inflammable, et brûle avec une flamme bleuâtre caractéristique; car l'oxide de carbone brûle avec une flamme bleue, et il est impossible de les confondre.

En chauffant de l'hydrogène sulfuré avec de l'étain, il y a décomposition : l'étain s'unit au soufre pour passer à l'état de sulfure, et on obtient un volume d'hydrogène égal à celui du gaz employé; ainsi, en retranchant de la densité 1,1912 de l'hydrogène sulfuré celle de l'hydrogène, 0,0688, la différence 1,1224 exprime le poids du soufre contenu dans un volume d'acide sulfhydrique. On peut prendre, en outre, des poids quelconques de ce gaz, et le poids de l'hydrogène et celui du soufre sont toujours dans le rapport de 0,0688 à 1,1224; ainsi donc, pour connaître le poids du soufre combiné avec un équivalent d'hydrogène 12.gr48, on pose la proportion :

$$0{,}0688 : 1{,}1224 :: 12.^{gr}48 : x, \text{ d'où } x = 203.^{gr}59.$$

nombre qui se rapproche beaucoup de l'équivalent du soufre 2.

201.^{gr}16; la différence provenant sans doute des erreurs commises dans la détermination des densités.

En posant les proportions suivantes, on connaîtra les poids du soufre et de l'hydrogène sur 100 grammes d'acide sulfhydrique :

$$1{,}1912 : 1{,}1224 :: 100 : S, \text{ d'où } S = 94.^{gr}22.$$

$$\text{et } 1{,}1912 : 0{,}0688 :: 100 : H, \text{ d'où } H = 5.^{gr}77.$$

Préparation. — On obtient l'acide sulfhydrique en faisant réagir de l'acide sulfurique étendu d'eau sur du sulfure de fer, lequel s'obtient en jetant dans un creuset incandescent un mélange intime de fleur de soufre et de limaille de fer. Il y a production d'acide sulfhydrique et il reste du sulfate de fer, ainsi que l'exprime la formule

$$FeS + SO^3.HO = FeO\,SO^3 + HS.$$

Le gaz, avant d'être recueilli dans une cloche plongeant dans le mercure, doit être préalablement lavé et desséché sur du chlorure de calcium. L'eau ne dissolvant que deux ou trois fois son volume du gaz, on peut le recueillir sur une cuve à eau, alors le flacon de lavage devient inutile.

Le gaz hydrogène sulfuré, préparé de cette manière, contient toujours de l'hydrogène libre qui est dû à la présence d'une certaine quantité de fer non attaqué par la préparation du sulfure; et pour ne recueillir que de l'hydrogène sulfuré, on fait réagir trois équivalents d'acide chlorhydrique sur un de sulfure d'antimoine :

$$SbS^3 + 3HCh = SbCh^3 + 3HS.$$

En général, en faisant réagir un des hydracides de la première classe sur un sulfure métallique quelconque, on obtient toujours de l'hydrogène sulfuré, et si nous appelons X l'acide employé, on a :

$$MS + HX = MX + HS.$$

Etat naturel. — L'hydrogène sulfuré existe dans un grand nombre d'eaux thermales appelées eaux sulfureuses. On le rencontre dans toutes les plantes crucifères, dans quelques matières animales, telles que les œufs, dans les fosses d'aisance et dans les gaz intestinaux.

§ 23. — ACIDES SÉLÉNHYDRIQUE ET TELLURHYDRIQUE.

Ces corps ont des propriétés analogues à celles de l'hydrogène sulfuré. — Tous trois, exposés à l'air, se décomposent : et

par addition d'acide sulfhydrique, l'acide sélénhydrique donne un précipité de sélénium, couleur rouge-cinabre; l'acide tellurhydrique, un dépôt de tellure, d'aspect métallique; et l'hydrogène sulfuré précipite du soufre.

COMBINAISONS DE L'HYDROGÈNE AVEC LE PHOSPHORE, L'ARSENIC, L'AZOTE ET LE CARBONE.

§ 24. — HYDROGÈNE PHOSPHORÉ.

On avait cru depuis longtemps à l'existence de deux hydrogènes phosphorés. L'un, hydrogène perphosphoré, H^2,Ph, et l'autre, hydrogène phosphoré PhH^3; mais M. Henri Rose a démontré qu'ils ne forment qu'un seul composé qui est tantôt spontanément inflammable, tantôt ne l'est pas. — Sa composition est exprimée par la formule H^3Ph.

Propriétés. — C'est un gaz incolore, d'une odeur fortement alliacée, bien caractéristique. Il se reconnaît des autres gaz par la propriété qu'il a de s'enflammer au contact de l'air, propriété qu'il est toujours facile de lui donner, s'il ne l'avait pas au moment de l'expérience.

Sa densité est 1,185. L'eau en dissout environ un vingtième de son volume.

Composition. — Un volume de ce gaz contient 1 volume et demi d'hydrogène et un quart de volume de vapeur de phosphore.

Préparation. — On l'obtient en introduisant dans un vase rempli d'eau du phosphore de calcium CaPh; l'hydrogène phosphoré se dégage, et il précipite de l'hypophosphite de chaux.

§ 25. — HYDROGÈNE ARSENIÉ.

L'hydrogène arsenié est un gaz incolore, d'une odeur fétide, mais peu intense.

Propriétés. — Sa densité est de 2,695. — Il se liquéfie sous une température de 30°. L'eau en dissout un dixième de son volume.

Il brûle en donnant naissance à de l'hydrogène et laisse déposer de l'arsenic métallique; il ne faut cependant pas que l'oxigène soit en excès, sans quoi tout l'arsenic passerait à l'état d'acide arsenieux.

Composition. — Un volume de ce gaz renferme une fois et demie son volume d'hydrogène et un quart de volume de vapeur d'arsenic. De là on conclut que 100 parties d'hydrogène arsenié contiennent 3,83 d'hydrogène et 96,17 d'arsenic. — Sa formule chimique est H^3. As.

Préparation. — On l'obtient au moyen d'un arseniure qu'on traite par de l'acide chlorhydrique concentré, ou par de l'acide sulfurique étendu.

§ 26. — AZOTURE D'HYDROGÈNE.

Cette combinaison est connue sous le nom d'ammoniac ou d'*alcali volatil.*

Propriétés. — L'ammoniac est un fluide élastique, incolore, d'une odeur vive et pénétrante. — Sa densité est de 0,591. — Il se liquéfie lorsqu'on l'expose à un froid de 40 à 50°, ou sous une pression de 6 à 7 atmosphères. La densité d'une dissolution d'ammoniac est de 0,9. — Cette dissolution jouit de toutes les propriétés du gaz.

Composition. — Un volume de gaz ammoniaque contient un volume et demi d'hydrogène ou 0,1032, et un demi volume d'azote ou 0,488, d'où l'on conclut que 100 parties de ce gaz contiennent 17,46 d'hydrogène et 82,54 d'azote. — L'ammoniac a pour formule chimique H^3Az.

Préparation. — On prend du chlorhydrate d'ammoniac qu'on mêle, parties égales, avec de la chaux vive. Le dégagement se fait à la température ordinaire, aussi ne faut-il pas chauffer fortement. — Il y a formation d'eau et de chlorure de calcium qui est fixe, et l'ammoniac est mis en liberté :

$$HCh,H^3Az + CaO = H^3Az + HO + ChCa.$$

Préparé de cette manière, le gaz est humide. On absorbe cette humidité en le faisant passer au travers d'un tube rempli de chaux caustique.

Quand on veut obtenir de l'ammoniac liquide, on fait passer le gaz dans une série de flacons remplis d'eau, en faisant plonger les tubes conducteurs au fond de chaque vase, pour que le mélange s'opère plus facilement.

Etat naturel. — L'ammoniac se rencontre dans les produits volcaniques à l'état de chlorhydrate; dans quelques mines d'alun, combiné avec l'acide sulfurique; dans l'air, à l'état de carbonate, et dans les urines de tous les animaux, combiné avec les acides carbonique et acétique.

Usages. — Il est principalement employé dans les laboratoires de chimie, en dissolution dans l'eau. On s'en sert quelquefois en teinture.

§ 27. — HYDROGÈNE PROTOCARBONÉ.

L'hydrogène protocarboné CH^2 est connu des mineurs sous

le nom de *grisou*. Il donne lieu à de fréquentes explosions dans les mines où il se trouve mélangé avec l'air atmosphérique et un peu d'hydrogène bicarboné, quand on l'enflamme à l'approche d'un corps en ignition.

Propriétés. — C'est un gaz incolore, insipide, inodore, légèrement soluble dans l'eau. Sa densité est de 0,5595. Dans l'air atmosphérique, il brûle avec une flamme jaunâtre.

Composition. — Il est formé d'un volume de vapeur de carbone et de deux volumes d'hydrogène condensés en un seul.

Préparation.—Ce gaz se rencontre dans la vase des marais, d'où on peut l'extraire facilement; mais il contient, dans cet état, de l'oxigène qu'on peut enlever au moyen du phosphore et de l'acide carbonique qu'on absorbe au moyen d'une dissolution de potasse. Quant à l'azote, qui est encore contenu dans le mélange, on ne connaît pas de moyen pour le séparer. Pour l'obtenir pur, on chauffe un mélange d'acide acétique concentré et de potasse ou de soude, et l'hydrogène protocarboné se dégage ainsi que le montre la formule

$$\underset{\text{(Acide acétique.)}}{C^4 H^4 O^4} + 2KO = 2KOCO^2 + C^2 H^4$$

§ 28. — HYDROGÈNE BICARBONÉ.

L'hydrogène bicarboné est connu aussi sous le nom de gaz oléfiant.

Propriétés. — Ce gaz est incolore, d'une odeur légèrement empyreumatique. Il est très-peu soluble dans l'eau. Sa densité est de 0,9814. Il est susceptible de se liquéfier sous une pression de quelques atmosphères. Il se dissout dans l'acide sulfurique; on met cette propriété à profit pour l'isoler quand il est mélangé avec de l'hydrogène protocarboné.

Composition. — Il contient quatre volumes de vapeur de carbone et quatre volumes d'hydrogène condensés en un seul, C^2,H^2.

Préparation. — On le prépare en faisant chauffer une partie, en poids, d'alcool avec quatre parties d'acide sulfurique concentré.

$$\underset{\text{(Alcool.)}}{C^4 H^6 O^2} + SO^3 HO = SO^3 H^3 O^3 + C^4 H^4$$

On voit que l'acide sulfurique enlevant à l'alcool H^2,O^2, l'hydrogène bicarboné devra se dégager.

COMBINAISONS DE L'AZOTE ET DE L'OXIGÈNE.

Ces combinaisons sont au nombre de cinq :

Le protoxide d'azote	$Az O$
Le bi-oxide d'azote	$Az O^2$
L'acide azoteux.	$Az O^3$
L'acide hypoazotique.	$Az O^4$
L'acide azotique.	$Az O^5$

§ 29. — ACIDE AZOTIQUE.

Il est connu sous le nom d'*acide nitrique*, parce qu'on l'extrait du salpêtre ou nitre. Cet acide est encore connu dans le commerce sous le nom d'*eau-forte*.

Propriétés physiques. — L'acide azotique est un liquide incolore dans son état de pureté, mais il a toujours une teinte jaunâtre qui tient à la présence d'une certaine quantité d'acide hypoazotique qui se développe lors de sa concentration, et sa formule alors est représentée par $Az O^5.HO$, parce que, dans cet état, il est toujours uni avec un équivalent d'eau; c'est alors de l'acide monohydraté. Sa densité, à son maximum de concentration, est exprimée par 1,522.

L'acide azotique est un liquide très-volatil, très-avide d'eau, aussi répand-il à l'air des fumées blanches qui sont dues à l'absorption de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère; il se transforme alors en acide azotique pentahydraté. Il entre en ébullition à la température de 75°.

Propriétés chimiques. — L'oxigène et l'azote sont sans action sur lui. L'hydrogène, à une faible température, le décompose en eau et oxide d'azote, souvent même l'azote devient libre. Le bore le décompose en produisant de l'acide borique, ainsi que le carbone qui produit de l'acide carbonique et des composés d'oxigène et d'azote. Avec le phosphore, il a une action très-vive et forme de l'acide phosphorique. A l'aide de la chaleur le soufre le convertit en acide sulfurique, et il se forme du bi-oxide d'azote. Le chlore et le brôme ne décomposent pas l'acide azotique. L'iode, en contact avec lui, se transforme en acide iodique. Tous les métaux attaqués par l'acide azotique sont convertis en nitrates.

Préparation. — L'acide azotique s'obtient en traitant un nitrate par de l'acide sulfurique hydraté. En appelant M le métal, potassium ou sodium, voici la formule qui représente la réaction :

$$AzO^5 MO + SO^3 HO = SO^3 MO + AzO^5 HO.$$

Il y a donc, comme on voit, formation d'un sulfate fixe, tandis que l'acide azotique se porte sur l'eau et se dégage.

Fabrication de l'acide azotique.

La fabrication de l'acide azotique est basée sur la décomposition de l'azotate de potasse ou de soude par l'acide sulfurique. Il est plus économique d'employer l'azotate de soude. On employait autrefois des cylindres en fonte; mais on leur a substitué une chaudière en fonte (*fig.* 7).

On prend de l'acide sulfurique hydraté qui a pour formule SO^3HO, car le nitrate ne contient pas d'eau. Soit X le nitrate employé; on aura pour formule représentant la réaction :

$$AzO^5X + SO^3HO = SO^3XO + AzO^5HO$$

Il y a, comme on voit, formation d'un sulfate fixe, et l'acide azotique, en se portant sur l'eau, se dégage.

L'acide ainsi préparé n'est pas pur, à cause de la présence des chlorures que les nitrates renferment presque toujours. Pour purifier l'acide, on le mélange avec du nitrate d'argent. Son acide azotique s'unit avec l'acide qu'on dégage, et l'oxide d'argent est converti en chlorure.

Dans la réaction des chlorures, il se forme de l'acide chlorhydrique et de l'acide sulfurique qui s'unissent avec l'oxide d'argent; le premier forme de l'eau avec l'oxigène de l'oxide; et l'excès de l'oxide d'argent forme, avec l'acide sulfurique, un sulfate fixe; en distillant ce mélange, on obtient de l'acide azotique pur. Le nitrate de plomb produit le même effet que le nitrate d'argent.

Pour reconnaître si l'acide azotique ne contient plus d'acides chlorhydrique et sulfurique, on l'essaie au moyen du nitrate d'argent, ou du chlorure de barium. L'acide chlorhydrique donne un précipité blanc de chlorure d'argent, et l'acide sulfurique forme un précipité insoluble de sulfate de baryte. On doit étendre les liqueurs de beaucoup d'eau.

Usages. — Cet acide est employé à la fabrication de l'eau régale, qui est formée de trois parties d'acide azotique et une d'acide chlorhydrique.

On s'en sert dans la teinture pour colorier la soie en un beau jaune orangé, etc.

§ 30. — ACIDE HYPOAZOTIQUE.

D'après les nouvelles expériences de M. Péligot, l'acide hypo-azotique est solide jusqu'à la température de —9°.

Il cristallise alors en prismes. Il entre en ébullition à 22°.

Au contact de l'air, il se répand des vapeurs rutilantes très-épaisses avec une forte odeur nitreuse.

Préparation. — On l'obtient en faisant passer dans un tube plongé dans un mélange réfrigérant du bi-oxide d'azote et de l'oxigène. L'acide hypoazotique se dépose dans le tube sous forme de cristaux.

§ 31. — ACIDE AZOTEUX.

D'après M. Péligot, cet acide n'aurait encore pu être isolé.

§ 32. — BI-OXIDE D'AZOTE.

C'est un gaz incolore qui est susceptible de se liquéfier sous une pression de plusieurs atmosphères. Sa densité est représentée par 1,0390. Au contact de l'air, il passe à l'état d'acide hypoazotique.

Composition. — Il se compose de deux volumes égaux d'azote et d'oxigène sans condensation.

Préparation. — Ce gaz s'obtient en faisant réagir l'acide azotique sur certains métaux, tels que le cuivre, l'argent et le mercure.

§ 33. — PROTOXIDE D'AZOTE.

Propriétés. — C'est un fluide élastique, incolore, inodore, qui possède une saveur légèrement sucrée. Il se liquéfie sous une faible pression. Il rallume les corps qui présentent encore quelques points en ignition.

Préparation. — Le protoxide se prépare au moyen de l'azotate d'ammoniac qu'on chauffe avec précaution ; il se dégage alors trois équivalents d'eau et deux de protoxide d'azote, et il ne reste rien dans le vase qui a servi à l'opération. L'azotate d'ammoniac a pour formule $AzO^5.H^3Az$.

COMBINAISONS DU SOUFRE ET DE L'OXIGÈNE.

Ces combinaisons sont au nombre de cinq :

Acide hyposulfureux.	S^2O^2, qui a pour équivalent	602,32
Acide sulfureux. . .	So^2.	401,16
Acide hyposulfurique.	S^2O^5.	902,32
Acide sulfurique. . .	SO^3.	501,16

Plus un nouvel acide S^3O^5, formé de la réunion d'un équivalent d'acide hyposulfureux et d'un équivalent d'acide sulfurique ; c'est l'acide sulfhyposulfurique, qui a pour équivalent 1103,48.

§ 34. — ACIDE SULFURIQUE ANHYDRE.

Propriétés. — Cet acide est solide, cristallisant en aiguilles

fines ; sa saveur est très-corrosive. Il fond à 25°, et donne un liquide qui bout à 30°. La densité de l'acide sulfurique est de 1,97 à la température de 18°.

Au contact de l'air, il absorbe de la vapeur d'eau, en répandant d'abondantes fumées ; il se produit alors de l'acide sulfurique monohydraté : SO^3HO. C'est cet acide qui est connu dans le commerce sous le nom d'*huile de vitriol*.

Préparation. — On le prépare au moyen du sulfate de protoxide de fer, ou vitriol vert, dont la formule est : $FeO, SO^3 + 7HO$. On lui enlève les sept équivalents d'eau en le desséchant dans un creuset, et en chauffant le résidu dans une cornue de grès ; il se dégage de l'acide sulfureux, de l'acide sulfurique anhydre et de la vapeur d'eau. La cornue contient pour résidu du protoxide de fer Fe^2O^3, sous forme d'une poudre rouge. L'acide sulfurique ainsi préparé est connu dans le commerce sous le nom d'acide sulfurique de *Nordhausen*, parce que c'est dans cette ville qu'il a été préparé pour la première fois. On l'appelle encore acide sulfurique fumant. En chauffant doucement ce corps, il s'en dégage des fumées blanches d'acide anhydre, qu'on condense dans un récipient refroidi. L'acide monohydraté reste au fond du vase.

§ 35. — ACIDE SULFURIQUE MONOHYDRATÉ.

Propriétés. — C'est un liquide inodore, incolore, qui, à la température de 15°, a pour densité 1,848. Sa consistance est oléagineuse. L'acide sulfurique bout à 326°, et si on le fait passer au travers d'un tube de porcelaine incandescent, il est décomposé, et on recueille du gaz sulfureux et de l'oxigène. L'acide sulfurique a une grande affinité pour l'eau ; aussi se produit-il une grande quantité de chaleur au moment où on mélange ces deux corps. On doit, dans ce cas, verser l'acide dans l'eau, qu'on agite pour éviter une trop brusque chaleur, qui peut s'élever jusqu'à 110°.

Fabrication de l'acide sulfurique. — Cette fabrication n'est pas très-ancienne ; elle repose sur la combustion du soufre en présence d'un corps oxigéné ; tel, par exemple, que le nitrate de potasse. Le premier procédé de fabrication consistait à faire arriver ce mélange dans de grands vases en verre, ou dans une chambre en plomb, dans laquelle roulait un charriot contenant une partie de nitre avec dix parties de soufre. Voici le procédé qu'on emploie actuellement : en A (*fig*. 8), on brûle du soufre qui produit de l'acide sulfureux, lequel cir-

cule dans une série de chambres en plomb M, N, P, Q ; en N, on dégage du bi-oxide d'azote au moyen de l'acide azotique, dans des capsules en fontes x, y, z; et, au moyen d'une chaudière à vapeur R, on lance dans les chambres un jet de vapeur d'eau pour détruire les cristaux qui se forment dans les chambres. L'acide sulfurique se rend tout formé dans la dernière chambre Q.

L'acide sulfurique ainsi préparé ne marque que 45^b; on le concentre alors dans des chaudières en plomb, puis après dans des vases de platine, jusqu'à ce qu'il marque 65° à l'aréomètre de Beaumé.

Usages. — L'acide sulfurique a une foule d'usages dans les arts : il est employé à la préparation des aluns, du sulfate de fer, du chlore, pour dissoudre l'indigo ; il sert à gonfler les peaux dans le tannage, etc. Depuis quelques années on l'emploie dans l'affinage des métaux précieux.

§ 36. — ACIDE SULFUREUX.

Propriétés. — C'est un gaz incolore, d'une saveur légèrement acide ; son odeur est vive, pénétrante et excite le larmoiement ; c'est celle qui se développe lorsqu'on brûle des allumettes soufrées. Sous la pression de deux atmosphères, ou avec un froid de 18 à 20°, ce gaz est susceptible de se liquéfier. Dans cet état, sa densité est de 1,42. On s'en sert pour produire un poids artificiel, en entourant de coton la boule d'un thermomètre ; si on la plonge dans de l'acide sulfureux liquide, et qu'on l'expose à l'air libre, le thermomètre, qui marque, par exemple, +10°, descendra à —57°, et dans le vide jusqu'à — 68°.

La densité du gaz acide sulfureux est de 2,2340. Un volume d'acide sulfureux est formé d'un volume d'oxigène et un sixième de volume de vapeur de soufre.

Propriétés chimiques. — Le carbone décompose l'acide sulfureux à une température élevée : il se produit de l'acide carbonique, de l'oxide de carbone et du carbure de soufre.

L'azote, le soufre et le sélénium sont sans action sur lui.

Le chlore et l'acide sulfureux produisent un corps liquide appelé chlorosulfurique : SO^2, Cl.

L'iode et le brôme présentent les mêmes phénomènes : SO^2I, SO^2Br représentent les acides iodo-sulfurique et brômo-sulfurique.

Préparation. — On le prépare de plusieurs manières : 1° en

chauffant ensemble du mercure et de l'acide sulfurique; 2° en faisant passer de l'acide sulfurique en vapeurs sur du carbone porté au rouge; 3° en chauffant fortement un mélange de deux parties de soufre avec une partie de peroxide de manganèse :

$$Mn\,O^2 + 2\,S = Mn\,S + SO^2.$$

Usages. — L'acide sulfureux sert au blanchiment de la soie ; il est employé pour les maladies de la peau; il sert à soufrer les tonneaux pour arrêter la fermentation, etc.

§ 37. — ACIDE HYPOSULFURIQUE.

C'est un liquide incolore et inodore; il est formé d'un équivalent d'acide sulfurique et d'un équivalent d'acide sulfureux.

Préparation. — On obtient l'acide hyposulfurique en faisant réagir l'acide sulfureux sur du peroxide de manganèse réduit en poudre très-fine :

$$2\,SO^2 + Mn\,O^2 = Mn\,O,\,S^2\,O^5.$$

§ 38. — ACIDE HYPOSULFUREUX.

L'acide hyposulfureux est un liquide incolore et inodore, qui se décompose au contact de l'air en soufre et en acide sulfureux. On l'obtient en faisant bouillir de la potasse dissoute dans l'eau avec du soufre; toutefois, un polysulfure métallique, exposé au contact de l'air humide, passe à l'état d'hyposulfite en absorbant l'oxigène de l'air.

§ 39. — ACIDE SULFHYPOSULFURIQUE.

Cet acide a été découvert dernièrement par M. Langlois, professeur de chimie à Strasbourg. Il s'obtient en décomposant par la chaleur un sulfhyposulfate de potasse :

$$K\,O\,S^3\,O^5 = K\,O\,S\,O^3 + S\,O^2 + S.$$

COMBINAISONS DU SÉLÉNIUM ET DU TELLURE AVEC L'OXIGÈNE.

Le sélénium se combine avec l'oxigène en trois composés :

Oxide de sélénium.	$Se\,O$
Acide sélénieux.	$Se\,O^2$
Acide sélénique.	$Se\,O^3$

Cet acide s'obtient en soumettant le sélénium, chauffé au rouge, à l'action du gaz hydrogène.

L'acide sélénique se prépare au moyen de l'azotate de po-

tasse et du sélénium ou un sélénium métallique. Il présente les mêmes propriétés que l'acide sulfurique; mais on les distingue facilement l'un de l'autre, en ce que l'acide sélénique jouit de la propriété de décomposer l'acide chlorhydrique en eau, en chlore et en acide sélénieux; et si l'on verse dans la liqueur de l'acide sulfureux, le sélénium se précipite.

Le troisième composé a des propriétés qui ne sont pas encore bien étudiées.

Le tellure, en s'unissant à l'oxigène, donne naissance à deux acides :

Acide tellureux.	$Te O^2$
Acide tellurique.	$Te O^3$

Ces deux corps jouissent à peu près des mêmes propriétés que les acides précédents.

COMBINAISONS DE L'OXIGÈNE AVEC LE PHOSPHORE, L'ARSENIC, LE CHLORE, LE BROME, L'IODE, LE CARBONE, LE BORE ET LE SILICIUM.

§ 40. — PHOSPHORE ET OXIGÈNE.

En admettant le nombre 392,310 pour l'équivalent du phosphore, les combinaisons de ce corps avec l'oxigène seront au nombre de cinq :

Acide phosphorique. . .	$Ph O^5$
Acide phosphoreux. . .	$Ph O^3$
Acide hypophosphoreux .	$Ph O$
Oxide rouge de phosphore	$Ph^2 O$
Acide hypophosphorique.	$Ph^3 O^3 = 2 Ph O^5 + Ph O^3$.

§ 41. — ARSENIC ET OXIGÈNE.

L'oxigène et l'arsenic donnent lieu à deux combinaisons :

Acide arsenieux.	$As O^3$
Acide arsenique.	$As O^5$

ACIDE ARSENIEUX.

Cet acide est connu dans le commerce sous le nom d'*arsenic*, de *mort-aux-rats*. Il est blanc, d'une saveur nauséabonde. C'est un des plus violents poisons; il agit en ulcérant les membranes de l'estomac. Il est peu soluble dans l'eau.

L'acide arsenieux se volatilise au rouge sombre et peut se liquéfier avec une pression de plusieurs atmosphères.

L'acide arsenieux est réductible par l'hydrogène qui le dé-

compose en eau et en arsenic. Le charbon le décompose, il résulte de l'acide carbonique, et l'arsenic se volatilise. L'hydrogène sulfuré produit de l'eau et du sulfure d'arsenic.

L'acide arsenieux est composé de 960,20 d'arsenic et de 300 d'oxigène.

Préparation.—Cet acide se forme directement quand on introduit de l'arsenic dans un vase chauffé au rouge. Dans le commerce, on l'obtient en chauffant au contact de l'air des minerais d'arsenic.

Usages. — On emploie cet acide dans la fabrication du vert de Schéèle, dans des verreries, pour hâter la vitrification.

ACIDE ARSENIQUE.

L'acide arsenique est solide, blanc; c'est un poison encore plus violent que l'acide arsenieux. Il est formé de 940,20 d'arsenic et de 500 d'oxigène. Il se comporte avec l'hydrogène, le carbone, comme l'acide arsenieux. On l'obtient en traitant l'acide arsenieux par l'acide azotique.

§ 42. — CHLORE ET OXIGÈNE.

Le chlore se combine en cinq proportions avec l'oxigène. L'équivalent du chlore étant 442,64, on a :

Acide hypochloreux.	ChO
Acide chloreux	ChO^3
Acide hypochlorique.	ChO^4
Acide chlorique	ChO^5
Acide perchlorique ou heptachlorique.	ChO^7

Ces composés ne peuvent pas s'obtenir directement ; ce n'est qu'à l'état naissant que le chlore et l'oxigène peuvent s'unir.

§ 43. — BROME ET OXIGÈNE.

On ne connaît qu'une seule combinaison, c'est l'acide brômique.

§ 44. — IODE ET OXIGÈNE.

L'iode a plus d'affinité pour l'oxigène. Ses composés sont plus stables ; ils sont au nombre de deux :

Acide iodique;
Acide hyperiodique.

D'après des observations nouvelles de M. Mitscherlich, qui ne paraissent pas très-concluantes, il se produirait en acide hypo-iodeux en faisant réagir l'iode sur une dissolution faible de potasse.

§ 45. — CARBONE ET OXIGÈNE.

Les combinaisons du carbone avec l'oxigène sont très-nombreuses. Nous ne parlons ici que de celles qui appartiennent au règne inorganique.

OXIDE DE CARBONE.

L'oxide de carbone est un gaz incolore et inodore, peu soluble dans l'eau. Sa densité est de 0,9732. Il est impropre à la combustion et à la respiration. Quand on l'enflamme, il brûle avec une belle flamme bleue, en donnant naissance à de l'acide carbonique. C'est un moyen de le reconnaître, car nous avons vu que le soufre seul brûle avec cette flamme. On pourra encore s'assurer si le gaz produit par la combustion trouble l'eau de chaux, qui accuse la présence de l'acide carbonique.

Le chlore agit sur l'oxide de carbone, à volumes égaux; exposés à la lumière solaire, la combinaison s'opère et il y a formation de gaz chlorocarbonique, COCh. Dans l'eau, cet acide se décompose en acide chlorhydrique et acide carbonique :

$$COCh + HO = HCl + CO^2.$$

Il faut 50 volumes d'oxigène pour donner, par la combustion complète de 100 volumes d'oxide de carbone, 100 volumes d'acide carbonique.

Préparation. — On l'obtient en versant de l'acide sulfurique concentré, en excès, sur de l'oxalate de potasse. On chauffe légèrement, et la réaction se manifeste. On se fonde sur la propriété dont jouit l'acide oxalique C^2O^3 de se décomposer en oxide de carbone et en acide carbonique, quand on lui enlève l'eau ou la base avec laquelle il était combiné.

Etat naturel. — Ce gaz n'existe point dans la nature, mais il se produit dans beaucoup de circonstances, toutes les fois qu'on met en contact à une haute température un excès de carbone avec de l'oxigène ou de l'acide carbonique. La flamme bleue qui se montre au gueulard des hauts fourneaux, n'est autre que la combustion de l'oxide de carbone.

ACIDE CARBONIQUE.

L'acide carbonique est un gaz incolore, son odeur est faible, et sa saveur est légèrement acide.

Propriétés. — Sa densité est exprimée par 1,5196. Cette densité considérable permet de verser l'acide carbonique d'un vase dans un autre, à la manière des liquides.

L'acide carbonique asphyxie promptement les animaux qu'on plonge dans son atmosphère. Ce gaz se produit dans toutes les circonstances. Les caves, les lieux souterrains sont souvent infectés par sa présence.

Composition. — D'après les expériences de M. Dumas, 1100 parties d'acide carbonique sont composées de 300 de carbone et de 800 d'oxigène, ou sur 100 parties :

72,27 carbone,
72,73 oxigène.

D'après cela, on peut arriver à connaître la composition de l'oxide de carbone, en sachant qu'un volume d'oxide de carbone a besoin d'un demi-volume d'oxigène pour se convertir en acide carbonique. Mais celui-ci contient un volume d'oxigène; par conséquent, un volume d'oxide de carbone contiendra un demi-volume d'oxigène. 100 parties d'oxide de carbone renfermeront

42,85 de carbone,
57,15 d'oxigène.

Pour avoir l'équivalent du carbone, on pose la proportion :

$$57,15 : 42,85 :: 100 : x, \text{ d'où } x = 75.$$

En prenant le nombre 275 qui représente l'équivalent de l'acide carbonique, si on veut savoir combien il renferme d'oxigène, on pose la proportion suivante :

$$100 : 275 :: 72,73 : x, \text{ d'où } x = 200.$$

D'où l'on voit que l'équivalent d'acide carbonique contient 2 équivalents d'oxigène et 75 de carbone ; la formule est donc représentée par CO^2. Pour l'oxide de carbone qui contient moitié moins d'oxigène pour une même quantité de carbone, elle est représentée par CO.

Préparation. — C'est un des gaz les plus faciles à préparer. On attaque le marbre blanc par l'acide chlorhydrique.

Réaction : $CO^2 CaO + HCh = CO^2 + CaOHCh + HO$.

Analyse de l'acide carbonique. — M. Dumas, dans ces derniers temps, a fait l'analyse de l'acide carbonique au moyen de l'appareil suivant (*Pl.* IX, *fig.* 6).

A est un flacon rempli d'oxigène dans lequel on fait arriver de l'eau au moyen d'un vase de Mariotte B. Le gaz étant chassé du flacon A traverse un tube C contenant de l'amiante humectée d'acide sulfurique, se dessèche et arrive dans un

tube D renfermant une dissolution de potasse caustique qui absorbe l'acide carbonique contenu dans l'oxigène du vase A. En E se trouve un tube chauffé au rouge, et dans lequel est placée une coupelle en platine renfermant du diamant ou carbone pur; l'oxigène se combine avec lui, en produisant de l'acide carbonique et une petite quantité d'oxide de carbone. Au moyen de la réduction, l'oxide de cuivre placé à l'extrémité du tube E se décompose, et tout l'oxigène se porte sur l'oxide de carbone et le convertit en entier en acide carbonique. Ce gaz et l'oxigène en excès traversent une série de tubes G, G, G remplis de potasse caustique qui fixe l'acide carbonique, et l'absorption est complète, lorsqu'on s'est assuré que le dernier tube M n'a pas changé de poids à la fin de l'expérience.

Etat naturel. — Toutes les eaux renferment de l'acide carbonique, quelques-unes en contiennent même de très-fortes proportions. L'air atmosphérique en contient environ les $^{6}/_{10000}$ de son volume. Enfin c'est un des gaz les plus abondants et les plus répandus dans la nature.

Liquéfaction et solidification de l'acide carbonique. — L'acide carbonique liquide est un fluide incolore, insoluble dans l'eau; mais soluble dans l'alcool, l'éther et les huiles essentielles. Sa tension est de 36 atmosphères à 0°, elle augmente avec la température d'environ une atmosphère par degré du thermomètre centigrade.

M. Thilorier a obtenu l'acide carbonique liquide au moyen du carbonate de soude, de l'acide sulfurique et de l'eau. On introduit dans un cylindre creux en fonte, de la capacité de six décimètres (302 pouces) cubes environ, 1 kilog. 1/2 (3 liv.) de bi-carbonate de soude, 3 litres 1/2 d'eau, puis un vase en cuivre contenant 1 kil. (2 liv.) d'acide sulfurique, et on ferme l'ouverture. L'acide sulfurique, en réagissant sur le bi-carbonate de soude, donne naissance à de l'acide carbonique qui, ne pouvant se dégager, exerce dans le cylindre une pression telle qu'il passe à l'état liquide. Pour recueillir ce gaz liquide, on met le cylindre générateur en communication avec un autre cylindre semblable au premier, mais vide et entouré d'un mélange réfrigérant, la distillation s'opère et on recueille l'acide carbonique à l'état liquide. Pour faire passer le gaz à l'état solide, on adapte un robinet muni d'un tube plongeant au fond du vase. Le robinet ouvert, le gaz liquide se vaporise très-rapidement, et, dans ce passage, l'acide carbonique se congèle en flocons d'une neige fine. Un thermomètre placé dans le jet

peut descendre jusqu'à — 90°. Dans cet état, l'acide carbonique mouillé avec de l'éther produit le meilleur réfrigérant qu'on connaisse. Il suffit d'une faible quantité de cette substance pour congeler le mercure. On a ainsi obtenu des masses de mercure qui se martelaient comme du plomb. On a frappé des médailles qu'on a pu conserver pendant une heure environ jusqu'à la vaporisation de l'acide.

§ 46. — BORE ET OXIGÈNE.

ACIDE BORIQUE.

On ne connaît qu'une seule combinaison du bore avec l'oxigène, c'est l'acide borique.

Propriétés. — C'est un acide très-faible à la température ordinaire, mais il est peu volatil, ce qui lui permet de chasser de leurs sels tous les acides volatils. Ainsi il décompose les sulfates en les transformant en borates et en acide sulfurique.

Composition. — L'acide borique est composé de :

Bore.	31,22
Oxigène.	68,78

Dans les borates neutres, la quantité d'oxigène de la base est à la quantité d'oxigène de l'acide, comme 1 est à 6 ; or, la quantité de bore qui se combine avec 600 d'oxigène pour former de l'acide borique, est égale à 272,40, équivalent du bore, et l'acide borique BO^6 a pour équivalent :

$$272,40 + 600 = 872,40.$$

Préparation. — On obtient cet acide en traitant le borate de soude dissous dans l'eau, au moyen de l'acide sulfurique. Il peut s'extraire encore des matières terreuses qui le contiennent, en les traitant par l'eau, qui dissout l'acide borique. On évapore, et l'acide borique reste pour résidu, mais il est coloré en jaune par des matières étrangères. On le prépare en chauffant à l'air, on brûle ainsi les substances organiques ; on reprend par l'eau pour faire cristalliser l'acide borique. Il se présente sous la forme de cristaux hexaèdres d'un aspect nacré.

Usages. — On l'emploie dans la fabrication du borax artificiel et pour vernir des poteries. Il sert aussi à l'analyse des gemmes qui contiennent de la potasse ou de la soude.

§ 47. — SILICIUM ET OXIGÈNE.

ACIDE SILICIQUE.

C'est un acide très-répandu dans la nature, où on le ren-

contre soit libre, soit combiné avec des oxides. Toutes les pierres précieuses sont formées d'acide silicique en combinaison avec divers oxides métalliques. Les terres labourables contiennent de l'acide silicique, de l'alumine et de la chaux.

Propriétés. — L'acide silicique cristallisé est transparent, insipide, inodore, et a pour densité 2,66. Il est insoluble dans l'eau.

Composition. — L'acide silicique sur 100 parties est formé de :

Silicium.	48,09
Oxigène.	51,91

L'équivalent du silicium étant représenté par 92,64, celui de l'acide silicique SiO, sera de :

$$100 + 92{,}64 = 192{,}64.$$

Préparation. — On obtient l'acide silicique parfaitement pur au moyen d'un silicate de potasse dissous dans l'eau. L'acide se précipite sous forme de gelée par addition d'un acide. On chauffe au rouge pour rendre la silice insoluble, et, au moyen de l'acide chlorhydrique, on dissout l'alumine qui était contenue dans le silicate. C'est par ce procédé qu'on dose toujours la silice.

COMBINAISONS DES MÉTALLOÏDES ENTRE EUX.

§ 48. — FLUORURE DE SILICIUM.

Ce gaz est appelé quelquefois acide fluosilicique. Sa formule est $Si.Fl$. Il se prépare en faisant agir l'acide fluorhydrique sur de l'acide silicique porté à une haute température. Voici le résultat de l'opération exprimé en équivalents chimiques :

$$SiO + HFl = HO + FlSi.$$

On obtient ce gaz plus facilement encore en chauffant deux parties de fluorure de calcium, une partie de sable réduit en poudre, qu'on arrose d'acide sulfurique, de manière à produire une bouillie liquide.

$$CaFl + SiO + SO^3HO = CaOSO^3 + HO + FlSi.$$

La densité de ce gaz est de 3,573.

A la température de 23° environ, l'eau absorbe 265 fois son volume de ce gaz; mais l'acide fluosilicique est décomposé, l'acide silicique se dépose, et il se forme de l'acide fluorhydrique qui, en se combinant avec le fluorure de silicium non dé-

composé, donne naissance à de l'acide hydro-fluosilicique, ou hydrate de fluorure de silicium. Avec la potasse, cet acide forme un sel très-peu soluble, aussi l'emploie-t-on fréquemment pour précipiter cette base. Dans les sels contenant de la baryte et de la strontiane, la baryte seule se trouve précipitée par addition d'acide hydro-fluosilicique.

§ 49. — FLUORURE DE BORE.

Le fluorure de bore, BFl^6, est un gaz incolore qui a pour densité 2,371.

Il s'obtient en chauffant dans un matras une partie d'acide borique vitrifié, deux parties de fluorure de calcium réduites en poudre et douze parties d'acide sulfurique concentré.

$$BO^6 + 6\,CaFl + 6\,SO^3\,HO = 6\,CaOSO^3\,HO + BFl^6.$$

C'est le gaz le plus soluble dans l'eau, qui en dissout 700 fois son volume. Il doit se passer dans cette action le même phénomène qu'on remarque dans la dissolution du fluorure de calcium, et qui donne naissance à de l'acide hydrofluosilicique.

§ 50. — CHLORURE DE BRÔME.

Propriétés peu étudiées.

§ 51. — CHLORURE D'IODE.

Il y a deux combinaisons :

Protochlorure d'iode. . . .	ICl^3
Perchlorure.	ICl^5

Ces corps sont solides, cristallins et d'une couleur jaune-pâle.

§ 52. — CHLORURE D'AZOTE.

C'est un liquide oléagineux, d'une densité égale à 1,6. Il détonne avec la plus grande violence à la température de 30°. On pense qu'il renferme un équivalent d'azote et trois de chlore.

§ 53. — CHLORURES DE SOUFRE.

Le chlore donne naissance à deux composés, en s'unissant avec le soufre :

Le protochlorure et le perchlorure.

Le protochlorure est un liquide jaune qui a pour densité 1,68.

Le perchlorure est un liquide rouge-foncé très-volatil et d'une pesanteur spécifique égale à 1,628.

§ 54. — CHLORURES DE PHOSPHORE.

Ils sont au nombre de deux :

Le protochlorure. . . . . . . $PHCl^3$

Et le perchlorure . . . . $PHCl^5$

Ils s'obtiennent en faisant arriver du chlore sec sur du phosphore préalablement desséché. Pour le perchlorure, on dégage le chlore en excès.

Le protochlorure est liquide, incolore, et a pour densité 1,47. Il bout à 78°.

Le perchlorure est solide, blanc, entrant en fusion à 135° et en ébullition à 150°. La densité de sa vapeur est exprimée par le nombre 4,79.

§ 55. — CHLORURE D'ARSENIC.

C'est un liquide incolore qui bout à 120°. La densité de sa vapeur est 6,3. Ce composé a pour formule $AsCl^3$.

§ 56. — CHLORURES DE CARBONE.

Ils ne se produisent que sous l'influence de corps appartenant à la chimie organique.

§ 57. — CHLORURE DE BORE.

C'est un gaz incolore qui a pour formule BCl^6.

§ 58. — CHLORURE DE SILICIUM.

C'est un liquide incolore. Il a pour formule SiCl.

§ 59. — BROMURES.

Leurs propriétés ont été mal étudiées ; ils ressemblent, du reste, aux chlorures correspondants.

§ 60. — IODURE D'AZOTE.

Ce corps a pour formule AzI^3. Il se produit toutes les fois qu'on met l'iode en contact avec une dissolution d'ammoniac. Voici le résultat de l'opération exprimé en équivalents chimiques :

$$4AzH^3 + 6I = AzI^3 + 3HI, H^3Az.$$

A l'état sec, ce composé détonne avec violence sous l'influence des causes les plus légères.

§ 61. — SULFURES DE PHOSPHORE.

Ces combinaisons ont été faites avec peu de soin, aussi ne sait-on rien sur la nature de ces corps.

§ 62. — SULFURES D'ARSENIC.

Les combinaisons du soufre et de l'arsenic sont au nombre de trois.

Le premier composé est connu dans le commerce sous le nom d'*orpiment*. Il a pour composition AsO^3. On l'obtient par la réaction de l'acide sulfhydrique sur une dissolution d'acide arsenieux.

$$3\,HS + AsO^3 = 3\,HO + AsS^3.$$

Dans le commerce, on le prépare en chauffant de l'acide arsenieux avec un excès de soufre, ou bien encore par le grillage des sulfo-arseniures de cobalt.

La seconde combinaison est le persulfure d'arsenic AsS^5, qui se produit en versant une dissolution d'acide sulfhydrique dans une dissolution d'acide arsenique.

$$5\,HS + AsO^5 = 5\,HO + AsS^5.$$

Le dernier composé est connu dans le commerce sous le nom de *réalgar*. Il existe dans la nature, en Bohême, et principalement en Chine et au Japon. Sa formule est AsS^2. On produit avec le réalgar ce qu'on nomme les feux blancs; c'est un mélange de deux parties de réalgar avec sept de fleurs de soufre et vingt-quatre d'azotate de potasse.

§ 63. — SULFURE DE CARBONE.

Il n'existe point dans la nature; on le prépare en mettant le soufre en contact avec le charbon à une haute température. Sa formule est CS^2; il a pour densité 2.66.

§ 64. — AZOTURE DE PHOSPHORE.

C'est un corps solide, blanc, indécomposable à la chaleur blanche. Il s'obtient en faisant arriver un courant d'ammoniac dans du protochlorure de phosphore.

ARTICLE II.

MÉTAUX.

Les métaux se divisent en six sections fondées sur leur affinité pour l'oxigène.

PREMIÈRE SECTION.

Potassium. — Sodium. — Lithium. — Barium. — Strontium. — Calcium.

Les métaux de cette section absorbent l'oxigène à toutes les températures, et décomposent l'eau à la température ordinaire. Les oxides de ces métaux sont appelés *alcalis*.

DEUXIÈME SECTION.

Magnésium. — Glucinium. — Yttrium. — Aluminium. — Thorinium.

Les métaux de cette section absorbent l'oxigène à toutes les températures, mais ne décomposent l'eau qu'à la température de son ébullition. Leurs oxides, connus sous le nom de *terres*, sont insolubles dans l'eau et irréductibles par l'hydrogène et le charbon.

TROISIÈME SECTION.

Manganèse. — Fer. — Zinc. — Cadmium. — Etain. — Cobalt. — Nickel. — Lanthane. — Cérium. — Dydine.

Ces métaux absorbent l'oxigène et le conservent aux plus hautes températures. L'eau n'est décomposée que quand ils sont portés au rouge.

QUATRIÈME SECTION.

Molybdène. — Chrôme. — Vanadium. — Tungstène. — Columbium. — Antimoine. — Titane. — Urane. — Bismuth. — Cuivre. — Plomb.

Ces métaux ne décomposent pas l'eau.

CINQUIÈME SECTION.

Osmium. — Mercure. — Ils ne décomposent pas l'eau, mais cèdent leur oxigène à une certaine température.

SIXIÈME SECTION.

Argent. — Palladium. — Rhodium. — Iridium. — Platine. — Or.

Ces métaux appelés métaux nobles ne se combinent jamais directement avec l'oxigène et ne décomposent pas l'eau, à quelque température que ce soit.

MÉTAUX DE LA PREMIÈRE SECTION.

§ 1er. — POTASSIUM.

Le potassium est un métal solide à la température ordinaire. Il est aussi ductile et plus mou que la cire. Quand on le coupe, il offre l'éclat métallique de l'argent, mais bientôt cette coupure se ternit au contact de l'air. La densité de ce métal est représentée par 0,865. Il entre en fusion vers 55°, et quand on

élève la température, il se volatilise sous forme de vapeurs vertes.

Préparation. — Le potassium s'obtient en décomposant la potasse par le fer à une haute température, ou bien encore en chauffant dans un fourneau à vent de la crême de tartre calcinée qu'on introduit dans une bouteille en fer.

COMBINAISONS DE L'OXIGÈNE AVEC LE POTASSIUM.

L'oxigène s'unit en trois proportions avec le potassium; et si on prend le nombre 489,916 pour représenter l'équivalent de ce métal, les oxides sont désignés par K^2O, sous-oxide de potassium; KO, protoxide de potassium; KO^3, peroxide de potassium. Le premier et le dernier de ces composés présentent peu d'intérêt.

PROTOXIDE DE POTASSIUM.

Propriétés. — Combiné avec l'eau, le protoxide de potassium forme la *potasse*; elle se présente sous forme de masses blanches, amorphes, d'une saveur très-caustique. Elle fond à 400° environ, elle se volatilise au rouge-blanc, mais elle attaque les vases qui la contiennent. La potasse décompose les matières organiques azotées en transformant l'azote en ammoniac. C'est une manière employée pour doser l'azote des substances qui en renferment.

En s'unissant avec tous les acides, la potasse forme des sels qui sont tous très-solubles, en général.

Préparation. — On place dans une bassine en fonte une partie d'azotate de potasse et deux parties de crême de tartre ou bitartrate de potasse, bien pulvérisées ensemble dans un mortier en fer. On porte au rouge. L'oxigène de l'azotate de potasse se porte sur le carbone de la crême de tartre et le brûle. Il reste donc du carbonate de potasse et un peu de charbon. On traite ce résidu par son poids de chaux vive et quinze fois son poids d'eau, qu'on remplace à mesure qu'elle s'évapore, il se forme de la potasse qui reste en dissolution; on filtre la liqueur à travers une toile serrée et on évapore la dissolution dans un vase de cuivre ou d'argent. On laisse refroidir, et la potasse se fige en masses blanches. On obtient de cette manière de la *potasse à la chaux*. Dans cet état, on voit qu'elle peut contenir de la chaux, du carbonate de potasse et plusieurs autres sels de potasse; il convient donc de la purifier : pour cela on la dissout dans de l'alcool concentré et on laisse reposer; il se forme bientôt deux couches dont la supérieure est la dis-

solution alcoolique. On décante, on évapore pour chasser l'alcool, puis enfin on chauffe dans un vase d'argent jusqu'au rouge naissant. La potasse ainsi obtenue est appelée *potasse à l'alcool* et est sensiblement pure.

Usages. — La potasse est employée dans les arts pour la fabrication des savons mous, des verres, des cristaux. Elle est connue en médecine sous le nom de *pierre à cautère.*

§ 2. — SODIUM.

Ce métal ressemble beaucoup au potassium, la différence entre ces deux métaux est la non-inflammation de l'hydrogène au moment où le sodium décompose l'eau. Sa densité est égale à 0,972, et entre en fusion à 90°. Nous avons vu qu'en distillant le potassium, il produisait des vapeurs vertes. Le sodium diffère encore de ce métal en ce qu'il donne des vapeurs incolores.

Préparation. — On suit le même procédé que pour la préparation du potassium.

COMBINAISONS DU SODIUM AVEC L'OXIGÈNE.

Ces combinaisons sont correspondantes à celles du potassium. Ainsi 290,897 représentant l'équivalent du sodium, le protoxide est exprimé par Na O. Les deux autres n'ont pas été jusqu'ici bien déterminés.

Hydrate de protoxide de sodium ou *soude.* — La soude se prépare de la même manière que la potasse. Mais les caractères essentiels qui distinguent ces deux bases, sont les suivants :

Les sels de soude deviennent efflеurescents au contact de l'air, tandis que ceux de potasse sont déliquescents. Les savons à base de soude sont solides, ceux de potasse ont toujours une consistance molle. Enfin les sels de soude ne sont pas précipités par les réactifs qui dénotent la présence de la potasse.

§ 3. — LITHIUM.

Ce métal ressemble au sodium. Son équivalent chimique est représenté par 80,375. L'oxigène ne forme qu'une seule combinaison avec le lithium, c'est la lithine. C'est de cette substance qu'on retire le métal, au moyen de la pile.

§ 4. — BARIUM.

Les propriétés du barium, à l'état métallique, sont presque inconnues. Son équivalent est 856,88.

L'oxigène, en se combinant avec lui, donne lieu à deux composés, le protoxide de Barium BaO et le peroxide BaO^2.

Le protoxide de barium se rencontre dans la nature combiné avec l'acide sulfurique et l'acide carbonique. L'hydrate de protoxide de barium ou *baryte* a pour formule BaO, HO ; il se dissout dans un dixième de son poids d'eau chaude. L'acide sulfurique concentré forme dans cette dissolution un précipité de sulfate de baryte insoluble qui sert à doser cette base.

On obtient ce métal au moyen de l'oxide qu'on soumet à l'action d'une forte pile.

§ 5. — STRONTIUM.

Ce métal ressemble beaucoup au barium. Son équivalent est le nombre 547,30 et forme avec l'oxigène deux combinaisons : le protoxide de strontium StO et le peroxide StO^2. Le protoxide de strontium a été trouvé dans un minéral à *Strontian*, en Ecosse, c'est là d'où lui vient son nom.

La strontiane est très-répandue dans la nature, on la trouve toujours avec la baryte.

Le strontium s'obtient de la même manière que le barium.

§ 6. — CALCIUM.

Le calcium a la couleur de l'argent. Il a pour formule 256,089, et forme avec l'oxigène deux combinaisons : le protoxide de calcium CaO, et le bi-oxide CaO^2.

Le protoxide de calcium ou *chaux* est très-répandu dans la nature, mais il n'est jamais pur. C'est une substance blanche, amorphe, qu'on a cependant fait cristalliser en évaporant de l'eau de chaux sous le récipient d'une machine pneumatique. Cette base a une grande affinité pour l'eau, elle se convertit alors en hydrate de chaux CaOHO, et, dans ce passage, sa température peut s'élever jusqu'à 400°.

La chaux s'obtient au moyen de la calcination du carbonate de chaux.

On distingue les chaux *grasses*, les chaux *maigres* et les chaux *hydrauliques*.

CHAUX GRASSES.

A mesure que la chaux s'éteint, elle augmente beaucoup de volume, cette augmentation est un caractère propre à la chaux grasse. — Elles ne sont jamais hydrauliques, c'est-à-dire qu'elles ne durcissent pas sous l'eau, à moins qu'on y ajoute une quantité convenable de pouzzolane, qui est l'argile calci-

née des volcans. — La chaux grasse s'obtient par la calcination d'un calcaire pur, ne renfermant que très-peu d'argile.

CHAUX HYDRAULIQUES.

Les chaux de cette espèce s'obtiennent par la calcination de pierres calcaires qui renferment de l'argile et de la silice pures. — Par la cuisson, il se forme des silicates de chaux et d'alumine basiques, qui, lorsqu'on les éteint, absorbent de l'eau et se solidifient en se conservant indéfiniment, à cause de leur peu de solubilité. Les chaux moyennement hydrauliques contiennent environ 0,15 d'argile, et elles possèdent la propriété hydraulique au plus haut degré, lorsqu'elles en renferment de 25 à 30 p. 100. On nomme ces dernières *ciment naturel, ciment romain.* Si la quantité d'argile était plus considérable que celle que nous venons de citer, la chaux n'absorberait plus l'eau et ne serait plus susceptible de se solidifier.

Il existe des chaux maigres, mais qui ne sont pas hydrauliques ; ce sont celles qui proviennent de la calcination des pierres très-magnésiennes.

Les chaux hydrauliques ne doivent pas être calcinées à un très-haut degré, car il se formerait entre les bases qui les composent une combinaison trop intime sur laquelle l'eau n'aurait plus d'action.

Analyse des pierres à chaux. — On pulvérise 10 grammes de matière à analyser qu'on délaie dans de l'eau; on verse ensuite un acide jusqu'à ce que toute effervescence ait disparu, puis on évapore jusqu'à consistance pâteuse ; on délaie dans un demi-litre d'eau ; on filtre, et l'on a l'argile qu'on pèse quand elle est desséchée. On calcine, on pèse de nouveau, P — P' exprime le poids de l'eau en combinaison. Dans le liquide qui a passé au travers du filtre on ajoute de l'eau de chaux, tant qu'il se forme un précipité, qu'on lave avec de l'eau distillée ; et on le pèse après calcination. Ce précipité représente la magnésie, mêlée de fer et de manganèse, généralement. Ces premières opérations étant terminées, on calcine à la chaleur blanche 5 grammes de la pierre; on pèse le résidu, et en retranchant du double de ce poids le poids de l'argile calcinée et de la magnésie, on obtient le poids de la chaux.

Composition de pierres calcaires donnant des chaux grasses et hydrauliques.

ÉLÉMENTS.	PIERRES CALCAIRES A CHAUX GRASSE :						
	Spath d'Islande.	Marbre blanc de Carrare.	Calcaire de St-Jacques. (Jura.)	Calcaire jurassique. (Ardèche.)	Calcaire grossier. (Seine.)	Calcaire d'eau douce (Seine-et-Marne.)	Calcaire d'eau douce près de Constance.
Chaux	0.564	0.554	0.546	0.541	0.556	0.548	0.504
Magnésie	»	0.004	0.009	0.006	»	0.009	0.018
Oxide de fer	»	»	»	0.005	»	»	»
Argile et quartz	»	0.010	0.015	0.022	0.015	0.010	0.069
Acide carbonique	0.436	0.432	0.430	0.426	0.429	0.433	0.409
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Carbonate de chaux	1.000	0.981	0.965	0.950	0.985	0.970	0.893
Carbonate de magnésie	»	0.009	0.020	0.013	»	0.020	0.038
Carbonate de fer	»	»	»	0.015	»	»	»
Argile et quartz	»	0.010	0.015	0.022	0.015	0.010	0.069
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ÉLÉMENTS.	PIERRES A CHAUX HYDRAULIQUES : MOYENNEMENT HYDRAULIQUES.			PIERRES A CHAUX HYDRAULIQUES : TRÈS-HYDRAULIQUES.			
	Calcaire jurassique près de Mâcon.	Calcaire jurassique. (Ain.)	Calcaire jurassique de Bigna.	Calcaire jurassique de Nîmes.	Calcaire jurassique de Metz.	Calcaire de Senonches.	Calcaire d'eau douce (Puy-de-Dôme.)
Chaux	0.503	0.524	0.503	0.467	0 432	0.451	0.410
Magnésie	0.014	0.002	0.009	0.019	0.016	0.007	0.023
Oxide de fer	»	»	»	»	0.018	»	»
Oxide de manganèse	»	»	»	»	0.009	»	»
Argile ou silice	0.078	0.076	0.090	0.134	0.159	0.185	0.230
Acide carbonique	0.403	0.398	0 398	0.380	0.368	0.357	0.347
	1.000	1 000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Carbonate de chaux	0.892	0.858	0.830	0.825	0.765	0.800	0.725
Carbonate de magnésie	0.030	0.004	0.020	0.041	0.030	0.015	0.045
Carbonate de fer	»	0.062	»	»	0.030	»	»
Carbonate de manganèse	»	»	»	»	0.015	»	»
Argile ou silice	0.078	0.076	0.150	0.134	0.152	0.185	0.230
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

MÉTAUX DE LA DEUXIÈME SECTION.

§ 7. — ALUMINIUM.

L'aluminium a la blancheur de l'étain. Il se prépare au moyen d'un mélange de potassium et de chlorure d'aluminium. Son équivalent chimique est 171,17. Il ne forme avec l'oxigène qu'une seule combinaison, qui est l'oxide d'aluminium ou *alumine*. Cette substance est très-répandue dans la nature; on la rencontre dans le saphir et le rubis, cristallisée en prismes hexaèdres ou en dodécaèdres triangulaires, quelquefois en rhomboèdres. Sa formule est $Al^2O^3 = 642.36$.

§ 8. — MAGNÉSIUM.

Le magnésium a la blancheur de l'argent, et entre en fusion à peu près au même degré que ce métal. Le magnésium Mg a pour équivalent 158,353 et forme avec l'oxigène l'oxide de magnésium ou magnésie, qui a pour formule MgO. Cette substance est blanche, très-légère, presque insoluble dans l'eau. On l'emploie dans la médecine contre les empoisonnements par les acides.

§ 9. — GLUCINIUM, YTTRIUM.

Ces métaux sont sans aucun intérêt et sans usage.

ÉQUIVALENTS.

Pour déterminer l'équivalent des métaux dont nous venons de nous occuper, et, par suite, obtenir les poids proportionnels, des oxides qu'ils engendrent, il faut se rappeler qu'on entend par équivalent d'un métal, la quantité pondérable de ce métal qui s'unit avec 100 d'oxigène, pour former le premier degré d'oxidation salifiable.

On emploie différents moyens pour analyser les oxides métalliques. Celui où le métal peut se doser à l'aide de la balance est le cas le plus simple. Ainsi, en chauffant au contact de l'air un poids de métal M représenté par 100, il s'oxide, et le résidu contient de l'oxide de ce métal représenté par $100 + a$, d'où l'on peut déterminer l'équivalent de M en posant la proportion :

$$a : 100 :: 100 : M.$$

On analyse encore l'oxide tout formé en le réduisant par l'hydrogène ou le charbon. Ce procédé offre un moyen de vérification important; il consiste à recueillir l'eau formée et à la doser avec précision. Soit x ce poids d'eau; l'oxide métallique

contient une quantité d'oxigène $y = \frac{x.100}{112,5}$. En pesant le métal résidu de l'opération, son poids est égal au poids de l'oxide métallique, moins la quantité d'oxigène représentée par y.

Si les métaux à analyser décomposent l'eau, on obtient leur équivalent en recueillant l'hydrogène.

SELS.

Un sel est le produit quelconque de la réaction d'un acide sur une base.

Les sels se divisent en trois grandes séries :

Oxisels, formés par l'union d'un oxacide avec un oxibase;

Sels haloïdes, union d'un métal et d'un métalloïde;

Sels de la troisième classe, composés de deux sulfures, deux séléniures, etc.

En se combinant deux à deux, les sels forment des sels doubles.

Les sels, pour la plupart, cristallisent et conservent généralement la couleur de leur base. Les sels ne sont pas tous solubles dans l'eau; mais ceux qui jouissent de cette propriété ont une saveur plus ou moins sapide. La pile les décompose, le métal se rend au pôle négatif, l'acide et l'oxigène vont au pôle positif.

§ 10. — SELS DE POTASSE.

Ces sels sont tous solubles, sans exception, mais à des degrés différents.

Les dissolutions des sels de potasse donnent :

Avec l'acide tartrique en excès.	*précipité blanc de bi-tartrate de potasse.*
Acide chlorique ou perchlorique.	*précipité blanc de chlorate de potasse.*
Acide hydrofluosilicique. .	*précipité blanc gélatineux de fluosilicate de potasse.*
Chlorure de platine concentré	*précipité jaune de chlorure double de platine et de potassium.*
Sulfate d'alumine	*alun qui se précipite en cristaux.*

CARBONATES DE POTASSE.

Ces sels sont au nombre de trois : carbonate neutre $KOCO^2$; bi-carbonate $KO(CO^2) + HO$; sesqui-carbonate $2KO.(CO^2)^3$.

Le carbonate neutre est connu dans le commerce sous le nom de potasse.

C'est en Russie et en Amérique, où le bois est commun, qu'on fait cette préparation. Le bois est brûlé sur le sol, les cendres sont lessivées à chaud, et la dissolution évaporée jusqu'à siccité ; le résidu contient du carbonate de potasse, du sulfate de potasse et du chlorure de potassium.

SULFATES DE POTASSE.

Ils sont au nombre de deux : sulfate neutre $KO.SO^3$, et le bi-sulfate $KO(SO^3)^2$.

CHLORATE DE POTASSE.

Il est l'objet, actuellement, d'une industrie assez considérable. On s'en sert pour la fabrication des allumettes oxigénées, et dans la préparation des poudres fulminantes. Il se prépare en faisant bouillir une dissolution concentrée de chlorure de chaux avec du chlorure de potassium. En abandonnant la dissolution à elle-même, le chlorate de potasse se précipite. Il a pour formule : $KOClO^5$.

Le perchlorate est représenté par $KOClO^7$.

Chlorure de potassium. — Ce sel est employé dans la fabrication du salpêtre et de l'alun.

§ 11. — SELS DE SOUDE.

Carbonate neutre de soude	$NaOCO^2$.
Bi-carbonate.	$NaO(CO^2)^2 + HO$.
Sesqui-carbonate. . . .	$2NaO.3CO^2 + 4HO$.

FABRICATION DE LA SOUDE ARTIFICIELLE.

On traite le sel marin par l'acide sulfurique ; il se produit de l'acide hydrochlorique qu'on dégage dans l'atmosphère par de hautes cheminées, et du sulfate de soude.

Ce sulfate de soude étant convenablement desséché, est introduit dans des fours à réverbère avec un mélange de craie et de charbon. Voici la composition du mélange :

Sulfate.	1000	kilogr.
Craie.	1000	*id.*
Charbon.	550	*id.*

Le mélange est versé par les trous *a*, *b*, *c*, pratiqués au sommet de la voûte du four à réverbère A (*Pl.* IX, *fig.* 7). Pour que la craie ne soit pas entraînée, on doit diminuer le tirage.

On étend environ 125 kilogrammes de mélange par mètre quarré de surface.

L'acide carbonique de la craie se porte sur la soude, l'oxigène de l'acide sulfurique et de la chaux réagit sur le charbon, et le soufre s'empare du calcium. Il se dégage donc de l'oxide de carbone et de l'acide carbonique, et il reste un mélange de charbon, de sulfure de calcium, de carbonate de soude, et un peu de soude caustique et d'hyposulfite de soude.

L'opération dure 4 heures, après quoi on ferme les portes; on ouvre les registres, et l'opération se continue jusqu'à ce que la partie supérieure du mélange commence à se fritter. Pour faire pénétrer la chaleur, on sillonne cette surface et on brasse la matière. On retire la soude quand on aperçoit des jets de flamme bleus qui sont dus à la présence de l'oxide de carbone.

On a construit des fours triples (*fig. 7 bis*). Le sulfate de soude se fait dans la partie A, et la soude dans la partie B.

Raffinage de la soude. — La soude ainsi préparée contient 40 à 50 p. 100 de carbonate de soude. Pour la purifier on la traite par l'eau, et on évapore dans une chaudière en fonte; la soude se précipite. On dessèche les cristaux de soude dans une étuve.

Pour rendre la soude caustique, il faut la réduire à l'état liquide et ajouter dans la dissolution de la chaux hydratée; on laisse déposer après avoir brassé fortement; le carbonate de chaux se dépose et on soutire à clair. Il faut évaporer très-rapidement pour empêcher que l'acide carbonique ne carbonate le liquide de nouveau. La lessive doit marquer 36° et ne pas précipiter par l'eau de chaux.

Bi-carbonate de soude. — On l'emploie dans la fabrication des pastilles de Vichy ou de d'Arcet. Mélangé avec de l'acide tartrique, il sert à la préparation des eaux de Seltz. On prépare ce sel en faisant passer un courant d'acide carbonique dans une dissolution de carbonate de soude.

Chlorure de sodium ou sel marin. — Ce sel a pour formule NaCl.

Il s'extrait en grande abondance du sein de la terre, il porte alors le nom de *sel gemme*. Dans les mines de Williczka, en Pologne, et dans plusieurs autres localités, il existe une variété de sel gemme qui dégage du gaz hydrogène protocarboné, fait qui, jusqu'à présent, est resté sans explication.

Extraction du sel. — Le sel gemme qu'on exploite dans les

mines n'est pas pur, il contient du fer, du manganèse et quelques sels de potasse; il faut donc le faire cristalliser après l'avoir dissous dans l'eau. Au lieu d'extraire ce sel et de le dissoudre dans l'eau, on pratique dans la mine des galeries dans lesquelles on fait arriver de l'eau jusqu'à saturation, et on la retire au moyen de pompes, d'où elle est portée dans des chaudières qui servent à son évaporation.

On rencontre dans la nature des sources qui contiennent jusqu'à 25 et 28 p. 100 de sel. Dans les pays méridionaux, on fait évaporer les eaux de la mer et on en retire le sel marin. Ce procédé est connu sous le nom de *procédé des marais salants*. Ce sont de grands bassins recouverts d'argile et creusés sur le bord de la mer. L'eau de la mer est conduite dans un réservoir appelé *jas* qui doit recevoir 65 centimètres (2 pieds) d'eau au moins. Dans ce réservoir l'eau commence à s'évaporer et surtout à se dépouiller des corps qu'elle tenait en suspension. Au moyen d'un tuyau dit *gourmas*, on la fait passer dans une série de bassins nommés *couches*; de ceux-ci, au moyen de *faux gourmas*, autres tuyaux souterrains, elle passe dans le *mort*, c'est un canal qui fait le tour du marais et auquel on donne jusqu'à 4000 mètres (12312 pieds) de longueur. Le *mort* amène l'eau dans de nouveaux bassins connus sous le nom de *tables*; de ceux-ci elle passe dans une suite de bassins semblables, désignés sous le nom de *muants*; des muants l'eau arrive enfin dans les *aires*, où s'achève son opération; elle y parvient par des canaux nommés *brassours*.

Le dépôt de sel s'annonce ordinairement par une teinte rougeâtre qui se développe dans l'eau. Le sel cristallise à la surface de l'eau; on brise la croûte, et lorsqu'il s'est formé une couche assez épaisse, le sel est placé en tas coniques nommés *pilots*, ou en tas pyramidaux appelés *vaches*; on les recouvre de paille ou d'herbages qui les garantissent de la pluie. Le sel ainsi conservé, s'égoutte, se purifie par l'action de l'humidité qui agit sur les sels déliquescents.

La quantité à évaporer est très-grande, car sur 100 parties l'eau de la mer contient :

Sel marin.	2,50
Chlorure de magnésium.	0,35
Sulfate de magnésie.	0,58
Carbonate de chaux et de magnésie. .	0,02
Sulfate de chaux.	0,01
Eau.	96,54

Il y a des pays où l'on fait usage de bâtiments de graduation : ce sont des hangars très-longs et assez élevés, ouverts à tous vents et dans lesquels on dispose des appareils destinés à diviser, autant qu'on le peut, l'eau à évaporer. Tantôt on se sert de fagots d'épines, disposés en parallélipipèdes rectangles, tantôt on emploie des cordes, tantôt enfin des tables. L'eau qui doit être concentrée est versée sur les fagots, où elle se divise en couches infiniment minces, coule d'une branche à l'autre, et se trouve, pendant tout son trajet, en contact avec l'air qui circule au travers des fagots.

Lorsqu'on se sert de cordes, elles sont tendues verticalement sous le hangar, et l'eau s'écoule le long de ces cordes; elle se divise donc beaucoup et offre à l'air de nombreux points de contact.

Dans les bâtiments à tables, on dispose sous le hangar deux rangées de cuvettes en bois, à rebords très-peu élevés. Ces cuvettes sont légèrement inclinées ; à leur partie déclive on a percé un trou qui permet à l'eau versée dans la cuvette supérieure de tomber dans celle qui est au-dessous, et ainsi de suite. L'air passe entre les cuvettes et lèche la couche mince d'eau salée qui s'y trouve, se sature de vapeur aqueuse et rend ainsi l'évaporation très-prompte. En Russie, on fait geler cette eau, et le sel marin se précipite par la congélation de l'eau pure.

La consommation du sel marin, en France, est annuellement de près de 300 millions de kilogrammes.

Consommation intérieure. . . .	180	millions de kil.
Fabriques de France	30	*id.*
Exportation.	80	*id.*
Grande pêche	40	*id.*
Petite pêche.	5	*id.*
Salines de l'Etat.	[illegible]	*id.*
Salines de l'Est	27	*id.*

SULFATES DE SOUDE.

Il en existe deux, analogues à ceux de potasse :

Sulfate neutre. . . . $NaOSO_3$
Bi-sulfate. . . . . $NaO\ (SO^3) + HO$

BORATE DE SOUDE.

Ce sel est connu sous le nom de *tinkal*, ou borax brut. Il se trouve en Transylvanie, mais surtout dans l'Asie méridionale.

Le borax sert à la soudure de l'or et à la brasure du fer et du cuivre. On l'emploie aussi dans la fabrication des émaux, dans la préparation de l'étamage polychrône, et pour les essais, au chalumeau, des minerais.

Le borax cristallise différemment, suivant la température à laquelle il a été soumis : à la température ordinaire, il cristallise dans l'eau en prismes hexaèdres; et a pour formule : ($NaOBO^6 + 10\ HO$); mais, entre 65° et 70°, il affecte la forme octaèdrique, et est représenté par ($NaOBO^6 + 5\ HO$).

§ 12. — SELS DE BARYTE.

Ces sels sont précipités par les carbonates solubles. Les sulfates solubles, ou l'acide sulfurique, donnent un précipité blanc de sulfate de baryte, insoluble dans l'eau et dans les acides, à l'exception de l'acide sulfurique très-concentré. C'est le meilleur caractère pour accuser la présence de la baryte.

§ 13. — SELS DE STRONTIANE.

Ces sels sont toujours unis aux sels de baryte. Ils se distinguent des sels de baryte en ce qu'ils colorent en rouge la flamme de l'alcool. Ils ne sont pas précipités par l'acide hydrofluosilicique; tandis que les sels de baryte donnent un précipité blanc demi-gélatineux. Les chlorures de strontiane cristallisent en aiguilles fines, déliées et très-aiguës, et les sels barytiques cristallisent en larges lames rhomboïdales : c'est un des meilleurs caractères qu'on connaisse.

Le carbonate et le sulfate de strontiane existent en grande quantité dans la nature. A Montmartre, près de Paris, le sulfate de strontiane est très-abondant; mais il contient 8 à 10 p. 100 de carbonate de chaux.

§ 14. — SELS DE CHAUX.

Ces sels ne sont pas précipités par l'acide sulfhydrique ni par les monosulfures. Le meilleur réactif employé pour les sels de chaux est l'acide oxalique, qui donne un précipité insoluble dans l'eau d'oxalate de chaux.

Carbonate de chaux. — Ce corps est un des plus répandus dans la nature; quand il est anhydre, sa formule est $CaOCO^2$.

Les terrains primitifs présentent le carbonate de chaux à l'état de marbres diversement colorés par des oxides métalliques, principalement par ceux de fer et de manganèse. Les calcaires des terrains secondaires se présentent en dépôts mêlés de coquilles et de sables quartzeux.

Le spath d'Islande est un carbonate de chaux, cristallisant en rhomboïdes.

On a décrit jusqu'à 154 espèces de carbonates de chaux.

Sulfate de chaux. — Ce sel est connu sous le nom de *gypse*, *sélénite*, *pierre à plâtre*.

Le sulfate de chaux contient presque toujours deux équivalents d'eau de cristallisation, et constitue, dans cet état, des montagnes entières, telles que celles de Montmartre, de Belleville, etc.

Fabrication du plâtre. — Cette fabrication a pour but de faire perdre au sulfate de chaux son eau de cristallisation. La cuisson du plâtre s'effectue de différentes manières, et la plus ancienne est encore journellement employée. Elle consiste à ranger des moellons de plâtre sur le sol, de sorte que les plus gros morceaux occupent la partie inférieure. Ils sont espacés entre eux, afin de recevoir le combustible propre à leur cuisson (*Pl.* IX, *fig.* 9).

M. Payen a construit des fours continus (*fig.* 10). A mesure que le plâtre est cuit, on le tire sous la voûte, et on charge le four avec des morceaux placés circulairement au niveau du gueulard.

On a utilisé la flamme des fours à réverbère pour la cuisson du plâtre. On employait, à cet effet, la disposition indiquée *fig.* 18.

Pour cuire les menus morceaux de plâtre qui se perdent dans les carrières, on a employé des cylindres en tôle forte de 3 mètres (9 pieds) de longueur sur 60 centimètres (1 pied 10 pouces) de diamètre; et, au moyen d'un engrenage, les cylindres prenaient un mouvement de rotation, et exposaient le plâtre à une température inférieure au rouge. M. Payen a modifié cet appareil en étendant le plâtre sur des plaques métalliques (*fig.* 17).

Chlorure de chaux.

On l'emploie dans le blanchiment des toiles, de la pâte à papier; il sert comme rongeur dans les fabriques d'impression sur toile. Il se prépare en faisant arriver un courant de chlore entre des tablettes placées les unes au-dessus des autres, et sur lesquelles on a étendu de la chaux hydratée en couches peu épaisses.

La force décolorante du chlorure de chaux est égale à celle du chlore qu'il renferme.

§ 15. — SELS DE MAGNÉSIE.

Par les carbonates alcalins *précipité blanc.*
Par les bi-carbonates. . . *rien.*
Après l'ébullition. . . . *précipité blanc.*

Ce caractère suffit pour distinguer la magnésie de la chaux, la baryte et la strontiane.

§ 16. — SELS D'ALUMINE.

Les sels d'alumine précipitent par les carbonates solubles; mais le précipité est de l'alumine pure en gelée, le carbonate n'existant pas. Avec les sulfates de potasse et d'ammoniac, il y a formation d'un précipité blanc octaèdrique d'alun. L'alumine chauffée avec le nitrate de cobalt est colorée en bleu.

Aluns. — Il existe deux espèces d'alun commercial : la première est un sulfate double de potasse et d'alumine; la deuxième est un sulfate double d'ammoniac et d'alumine.

L'alun à base de potasse a pour formule :

$$KOSO^3 + Al^2O^3(SO^3)^3 + 24HO.$$

Il cristallise ordinairement en octaèdres transparents et légèrement efflorescents. Lorsqu'il cristallise en cubes, il porte le nom d'*alun cubique*. Calciné, il perd ses vingt-quatre équivalents d'eau, et porte le nom d'*alun calciné*. On l'emploie en médecine pour ronger les chairs.

L'alun à base d'ammoniac a pour formule :

$$H^4AzO\,SO^3 + Al^2O^3(SO^3)^3 + 24HO.$$

Il se distingue du précédent en ce que, broyé avec de la chaux, il dégage de l'ammoniac.

Ces deux aluns sont assez rares dans la nature; on les rencontre principalement dans les fissures de certains schistes, qui portent le nom de *schistes alumineux*.

Dans le commerce, on prépare l'alun soit avec les schistes alumineux, soit à l'aide des argiles aluminifères. On expose ces schistes à l'air pendant un certain temps, après quoi on lessive la matière : la dissolution contient du sulfate de fer et d'alumine. On ajoute alors du sulfate de potasse ou d'ammoniac, et l'alun se dépose; mais, pour l'avoir pur, on lui fait subir plusieurs cristallisations qui lui enlèvent le sulfate de fer qu'il contenait encore.

Quand on le prépare avec des argiles aluminifères, on les calcine, et, au moyen de l'acide sulfurique, on obtient du sulfate d'alumine, qu'on traite par le sulfate de potasse ou d'ammoniac.

Il existe dans la campagne de Rome un minéral connu sous le nom d'*alunite*, ou pierre d'alun. Après l'avoir pulvérisée, on la calcine, et on l'expose à l'air en l'arrosant d'eau. Cette exposition est longue, et dure jusqu'à trois mois ; la matière est ensuite lessivée ; l'alun se dissout et cristallise.

L'alun est employé en teinture pour mordancer les étoffes. Il sert à la préparation de l'acétate d'alumine, qui est le meilleur des mordants.

ARTICLE III.

ALCALIMÉTRIE.

Dans le commerce, on désigne sous le nom de *soude* et de *potasse* des produits qui ne sont que les carbonates de ces bases.

Ces sels, qu'on extrait des cendres des végétaux, contiennent, en outre, des chlorures de potassium et de sodium, et des sulfates de soude et de potasse.

M. Gay-Lussac a donné un procédé au moyen duquel on peut reconnaître la proportion de potasse ou de soude unie à l'acide carbonique, dans un poids donné.

Ce procédé est fondé sur les principes suivants :

1° La teinture de tournesol est faiblement rougie par l'acide carbonique ;

2° L'acide sulfurique, au contraire, fait passer la liqueur de tournesol à un rouge très-vif ;

3° Cinq grammes d'acide sulfurique concentré sont capables de saturer 4.8807 de potasse caustique.

Conduite de l'opération.

On prépare 50 grammes d'acide sulfurique concentré, en ajoutant de l'eau distillée en quantité suffisante pour obtenir une dissolution d'un demi-litre : cette liqueur porte le nom de liqueur normale. Au moyen d'une pipette graduée, on aspire 50 centimètres cubes de cette liqueur, qu'on verse dans une éprouvette divisée en cent parties égales. D'une autre part, on dissout, dans un demi-litre d'eau distillée, 48.807 de la matière à essayer, et on verse un demi-décilitre de cette dissolution dans un vase, avec de la teinture de tournesol. Le liquide de l'éprouvette contenant la liqueur normale est versé dans ce vase, qui contient la dissolution de potasse : le tournesol prend d'abord une faible couleur rouge, due au dégagement de l'acide carbonique, et la saturation est complète lorsque

la teinte est couleur pelure d'oignon. On voit que si la potasse avait été pure, il eût fallu les cent divisions de l'éprouvette pour la complète saturation. Donc, si l'on a versé jusqu'à la $x^{ième}$ division, la potasse à essayer contient x p. 100 de potasse réelle.

On peut recommencer plusieurs fois l'expérience, pour avoir une approximation plus exacte.

ARTICLE IV.

ANALYSE MINÉRALE.

VOIE SÈCHE ET VOIE HUMIDE.

Les métaux peuvent se grouper en cinq sections, qui offrent des caractères particuliers, au moyen desquels il est facile de les reconnaître.

1er *groupe.* Métaux décomposant l'eau à la température ordinaire.	1re division.	Potassium. Sodium. Lithium.	Les sels de ces métaux ne sont pas précipités par les carbonates.
	2e division.	Barium. Strontium. Calcium.	Les sels de ces métaux sont précipités par les carbonates.
2e *groupe.* Métaux qui se dissolvent dans l'acide sulfurique étendu.	1re division.	Cadmium. Manganèse. Cérium. Magnésium. Yttrium. Zinc. Glucinium. Aluminium.	Dissolutions incolores.
	2e division.	Fer. Nickel. Cobalt.	Dissolutions colorées.

Le nickel et le cobalt ne se dissolvent dans l'acide sulfurique que quand ils sont très-divisés.

3e *groupe.* Métaux qui se dissolvent dans l'acide azotique.	1re division.	Mercure. Arsenic. Tellure. Bismuth. Plomb. Argent.	Dissolutions incolores. Les quatre derniers métaux sont moins volatils que les deux premiers.
	2e division.	*Cobalt.* Palladium. Cuivre. Vanadium. *Nickel.* Urane.	Dissolutions colorées.

Métaux ne se combinant pas avec l'acide azotique.	3e division.	Etain. Antimoine. Molybdène.	Donnant un précipité blanc avec l'acide azotique.

4e *groupe.* Métaux attaquables par l'eau régale.	Or. Platine. Titane.	Dissolutions colorées.

Le titane n'est attaquable que quand il est en poudre très-divisée.)

5e *groupe.* Métaux attaquables par l'azotate de potasse à une température rouge.	Chrôme. Columbium. Osmium. Tungstène. Rhodium. Iridium.

Premier groupe. — Première division.

POTASSIUM.

Ce métal se reconnaît parfaitement bien par la propriété qu'il a de brûler sur l'eau avec une flamme pourpre. Au moment où le potassium arrive sur l'eau renfermée dans une éprouvette remplie de mercure, une vive effervescence se manifeste, et le potassium s'évapore de l'oxigène, s'oxide, et met l'hydrogène en liberté. Cette combinaison est représentée par la formule :

$$HO + K = KO + H.$$

L'eau qui a servi à décomposer le métal est devenue alcaline. Si on évapore la liqueur, et qu'on sature par l'acide chlorhydrique, on obtient un chlorure qui, en contact avec l'acide tartrique, forme du bitartrate de potasse blanc ; mais si on ajoute de l'eau, le précipité disparaît : il faut donc avoir les liqueurs concentrées.

Le chlorure de potassium avec du chlorure de platine donne naissance à un chlorure double, jaune, qui est peu soluble. Le chlorhydrate d'ammoniac forme aussi, avec le chlorure de platine, un chlorure double semblable au premier ; mais le sel ammoniaque laisse dégager de l'ammoniac qui est facile à reconnaître :

Avec l'acide carbazotique. .	*précipité jaune de carbazotate de potasse.*
Avec l'acide hydro-fluosilicique.	*précipité blanc gélatineux.*
Avec le sulfate d'alumine. .	*précipité d'alun qui se dépose en cristaux.*

L'hydrogène sulfuré, les sulfures, les carbonates se précipitent par la potasse. Ce caractère, comme nous l'avons vu, distingue cette dernière de suite des oxides métalliques des cinq dernières sections.

Parmi les combinaisons que le potassium peut embrasser, on verra qu'il s'allie avec les corps simples non métalliques. Ces alliages décomposent l'eau. Quand le potassium est combiné avec des acides organiques, il faut faire usage de réactifs, car les sels de potasse ne décomposent pas l'eau. Quand le potassium est allié aux métaux, il constitue deux espèces d'alliages : 1° ceux qui décomposent l'eau ; 2° ceux qui ne la décomposent pas.

Dans le premier cas, on réduit en poudre fine pour que l'action de l'eau puisse être immédiate, et on mesure la quantité d'hydrogène formée. On filtre et on sature par l'acide chlorhydrique. Si l'alliage contient du cuivre et du fer, on doit dissoudre dans les liqueurs qui servent à la dissolution de ces métaux.

L'acide sulfhydrique précipite le cuivre.

Pour le fer, on précipite par le sulfhydrate d'ammoniac; la dissolution filtrée, évaporée, chauffée au rouge, laisse dégager l'excès de sulfhydrate, et il reste du sulfate de potasse. Si le métal ne précipite pas par ces deux réactifs, on a recours à du carbonate d'ammoniac; s'il n'y a pas de précipité, il ne reste que les potassium, sodium et lithium. Le potassium est-il à l'état de phosphore, d'arseniure ou d'azoture, on traite comme les métaux alliés qui décomposent l'eau. Les sulfures, brômures, etc., se dissolvent dans l'eau sans la décomposer.

Toutes les combinaisons solubles donnent, comme nous l'avons vu, avec l'acide tartrique, un précipité de bitartrate de potasse, quand les liqueurs sont concentrées. Si on ajoute de l'eau, la dissolution devient limpide.

Avec l'acide perchlorique, il y a un précipité de perchlorate de potasse peu soluble.

Si ces combinaisons sont tout-à-fait insolubles, on emploie plusieurs méthodes (analyse des verres, porcelaines, feldspath). On rend la matière soluble en calcinant avec excès de base. Le produit sera toujours soluble dans les acides. On prend la baryte à l'état d'azotate, qui convient le mieux pour cette opération. On réduit le mélange en poudre bien divisée; puis on le chauffe jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de

gaz. Au bout de trois quarts-d'heure environ, la matière est décomposée; on verse alors de l'eau, puis de l'acide chlorhydrique bien pur. Toutes les bases se trouvent dissoutes. On évapore à siccité, on reprend par l'eau, on filtre et on a l'acide silicique. La liqueur passée est saturée par l'acide sulfurique. On ne met pas un excès d'acide pour précipiter le sulfate de baryte. S'il reste de la baryte, on la précipite par du carbonate d'ammoniac. Quand on a évaporé, il reste des sels ammoniacaux et de potasse. On calcine, et les sels de potasse restent pour résidu. L'opération doit être faite dans un creuset d'argent, et non de platine; ce creuset est recouvert d'un entonnoir, dans la douille duquel s'engage un tube qui sert à verser les liqueurs.

Si la matière, outre la potasse, renfermait des sels de soude, de lithine et de magnésie, ou seulement l'une de ces trois bases, on devrait ajouter un excès d'acide sulfurique; on formera alors des sulfates.

Si le composé contient de la potasse et de la soude, on laisse le potassium et le sodium à l'état de chlorures, puis on ajoute à la dissolution de l'éther et de l'alcool, ensuite du chlorure de platine. Il se formera un chlorure double de platine et de sodium qui n'est pas soluble dans un mélange d'éther et d'alcool. On filtre et on calcine pour chásser le chlorure.

On emploie une autre méthode. On précipite la baryte par l'acide sulfurique; on pèse les sulfates et on a l'acide sulfurique.

Soient *m* un équivalent de potasse. . = 589
n un équivalent de soude . . = 390
p un équivalent d'acide sulfurique = 501
a poids de So^3 trouvé . . . = 5 grammes.
b poids du mélange. . . . . = 10 *idem*.
x potasse cherchée,
y soude cherchée,

on aura les équations suivantes :

$$x = \frac{(m\,p\,(b-a) - an)}{p\,(m-n)}$$

$$y = b - a - x$$

Exemple.

$$x = \frac{589(501\,(10-5)-5\times 390)}{501\,(589-390)} = 3.2 \text{ de potasse.}$$

$$y = 10 - 5 - 3.2 = 1.8 \text{ de soude.}$$

donc :	3.g.20	potasse ;
	1. 80	soude ;
	5. 00	acide sulfurique.
	10.g.00	sulfates mélangés.

Si on suppose les quatre bases réunies, on les amène à l'état de sulfates ; on pèse ensuite. On mêle le mélange avec de l'acétate de baryte ; on calcine pour chasser l'acide acétique ; on convertit ces sels en carbonates solubles, excepté pour la magnésie qui est calcinée jusqu'au rouge ; on verse dans la liqueur de l'acide chlorhydrique, et on a des chlorures. Si on veut avoir la lithine, il faut amener cette base à l'état de phosphate double de lithine et de soude. On évapore ; on reprend par l'eau qui dissout les autres sels et laisse le phosphate double. On précipite la potasse par l'alcool, l'éther et le chlorure de platine. Par le calcul on obtient la soude.

SODIUM.

Le sodium se distingue facilement du potassium ; comme lui il prend feu au contact de l'air et décompose l'eau à la température ordinaire, mais l'hydrogène qui se dégage ne s'enflamme pas. Pour déterminer cette inflammation, il faut empêcher les mouvements rapides du sodium sur l'eau, en la rendant visqueuse au moyen de la gomme ; dans ce cas, le métal ne se refroidit plus autant, et la température s'élève assez pour permettre à l'hydrogène de brûler.

Le protoxide de sodium se prépare en chauffant un équivalent d'hydrate de protoxide de sodium avec un équivalent de ce métal. Cette décomposition est exprimée par la formule suivante :

$$NaO, HO + Na = 2\,NaO + H.$$

Si on sature l'oxide de sodium par l'acide chlorhydrique, le chlorure de potassium ne forme aucun précipité. On pourrait, dans ce cas, le confondre avec le lithium ; mais si le phosphate de soude et l'ammoniac n'y forment pas de précipité, on peut être certain que c'est du sodium.

On peut traiter aussi la soude avec l'acide sulfurique ; on forme alors un sulfate de soude qui cristallise en longs prismes hexaèdres.

La soude ne précipite pas les réactifs qui dénotent la présence de la potasse.

Les acides chlorique et perchlorique qui précipitent en blanc la potasse, ne produisent rien sur la soude.

Enfin, la soude, en s'unissant à l'acide carbonique, produit un sel qui s'effleurit au contact de l'air, tandis que, dans les mêmes circonstances, le sel de potasse tombe en déliquescence.

LITHIUM.

L'oxide de lithium, ou lithine, se rencontre dans quelques minéraux : le *pétalite*, le *triphane* et la *tourmaline apyre*. On doit le fondre dans un creuset d'argent, car cet oxide attaque fortement le platine.

Son chlorure colore en rouge la flamme du chalumeau. Les sels de strontiane produisent le même effet ; mais ces derniers sont précipités par les carbonates, tandis que ceux de lithine ne le sont pas.

Avec du phosphate de soude et de l'ammoniac les sels de lithine forment un précipité qui apparaît au bout de quelque temps.

Deuxième division.

BARIUM.

Les trois derniers métaux de cette division sont rares.

Le protoxide de barium, ou baryte, existe abondamment dans la nature ; il est presque toujours combiné avec les acides sulfurique et carbonique.

Supposons le résidu saturé par l'acide chlorhydrique. Le chlorure de barium évaporé laisse des cristaux lamelleux qui ne s'effleurissent pas au contact de l'air; ils sont insolubles dans l'alcool. L'acide sulfurique donne naissance à des précipités de sulfate de baryte. Il en est de même des deux autres métaux; mais l'acide fluosilicique précipite le chlorure de barium. Avec le sulfate de strontiane, formation de sulfate de baryte peu abondant.

Le barium produit des combinaisons binaires avec certains corps simples. Si ce métal est allié, on traite par l'eau, et le barium s'oxide; s'il ne domine pas, on traite par un acide. Les chlorures, phosphures, etc., doivent être traités par l'eau. Dans le cas où le sel est insoluble, on traite par un acide.

Si le barium est combiné avec des matières animales ou végétales, on calcine; on a du carbonate de baryte qui, dissous dans l'acide chlorhydrique, donne un chlorure. Si on a de la baryte combinée avec un corps insoluble dans l'eau et les acides (verres - poteries), on fait agir sur ce sel le carbonate

de soude ou de potasse, il y a formation de carbonate de baryte. Le sulfate de baryte s'analyse au moyen du carbonate de soude; il se forme du sulfate de soude et du carbonate de baryte; dans ce cas, la base et l'acide tendent à s'unir. Le silicate traité par le carbonate de soude ne donnerait rien, parce que l'acide silicique est plus faible que l'acide carbonique; dans ce cas, il faut porter la température au rouge; l'acide carbonique se dégageant, l'acide silicique forme des sous-sels. La matière doit être chauffée avec cinq à six fois son poids de carbonate de soude.

Le barium produit, avec l'acide sulfurique et les sulfates.	*précipité blanc insoluble dans un excès d'acide.*
Avec l'acide fluosilicique.. . .	*précipité blanc de fluosilicate de baryte.*
Avec un carbonate alcalin. .	*formation d'un carbonate de baryte un peu soluble dans l'eau.*
Avec de la potasse. . . .	*précipité de baryte hydraté. Ce précipité disparaît par addition d'eau, quand les alcalis sont purs.*

L'ammoniac ne précipite pas les sels de baryte.

Avec les sulfures. . . . . *rien.*

La baryte se dose toujours à l'état de sulfate de baryte, mais on doit éviter d'ajouter un excès d'acide sulfurique. Ce caractère permet de reconnaître des traces insensibles de baryte.

STRONTIUM.

Le strontium ressemble à tous égards au barium. Dans leur état naturel, les sels de ces deux métaux sont toujours réunis.

Les sels de strontiane se distinguent des sels de baryte par la propriété qu'ils ont de colorer en rouge la flamme des corps en combustion.

Ils ne sont point précipités par l'acide fluosilicique. Les carbonates et bicarbonates précipitent en blanc.

Avec la potasse . . . . . *précipité blanc.*

Avec l'ammoniac . . . . . *rien.*

L'acide oxalique ne précipite qu'à la longue, ainsi que le succinate d'ammoniac.

Le sulfate de strontiane n'est pas soluble dans l'alcool absolu.

Une partie de ce sel est dissoluble dans 2000 parties d'eau.

L'acide hydro-fluosilicique ne produit, comme nous l'avons vu, aucun précipité dans les sels de strontiane, mais il précipite les sels de baryte. En ramenant ces deux sels à l'état de chlorure, on a avec le sel barytique un chlorure correspondant cristallisant en larges lames rhomboïdales, tandis qu'avec le sel de strontiane, on obtient un chlorure cristallisant en aiguilles fines, déliées et très-aiguës; ce caractère est l'un des meilleurs que l'on connaisse. Chauffés avec le soufre, les sels de strontiane donnent naissance à un monosulfure blanc. Les sels de baryte produisent un trisulfure vert.

On peut séparer très-exactement la baryte de la strontiane au moyen du chrômate neutre de potasse qui précipite la première terre, mais non la seconde quand les dissolutions sont étendues. Pour déterminer la proportion de baryte avec exactitude, il faut calciner le chrômate au rouge et bien laver.

Le sesquicarbonate d'ammoniac ne précipite pas complètement la strontiane, mais l'oxalate d'ammoniac la précipite en totalité.

CALCIUM.

Les sels de chaux sont incolores quand l'acide lui-même est incolore. Leur saveur est semblable à celle des sels de baryte. Dissous dans l'alcool, ils brûlent avec une flamme semblable aux sels de strontiane. Le chlorure donne naissance à un produit qui cristallise lorsque la température est basse. Il tombe en déliquescence et est soluble dans l'alcool. Au chalumeau, un sel de chaux manifeste une vive ignition.

Avec la potasse, les sels de chaux donnent un précipité blanc floconneux.

La soude produit le même effet.

L'acide fluosilicique ne produit rien.

Dissous dans l'eau, ils sont précipités par les carbonates solubles. Le précipité, gélatineux lorsque les liqueurs sont concentrées, devient grenu quand on ajoute de l'eau.

Le meilleur caractère pour reconnaître les sels de chaux, est l'acide oxalique combiné avec la potasse, la soude ou l'ammoniac, de manière à former des sels neutres.

L'oxalate de chaux qui se produit est insoluble dans l'eau, mais il faut opérer à chaud sur un bain de sable, à la température de 40 ou 50 degrés. Ce précipité est insoluble aussi dans les acides végétaux, et soluble dans les acides minéraux, pourvu que ceux-ci ne forment pas, avec la chaux, un sel insoluble.

Si on a un mélange de calcium, barium et strontium, on opère la séparation en convertissant en chlorures, et on reprend par l'alcool. L'acide fluosilicique précipitera le barium. A l'aide de l'acide sulfurique, en ayant soin d'étendre d'eau la liqueur, on peut séparer le barium et le calcium. Pour séparer la chaux de la strontiane, on convertit en azotates et on traite par l'alcool ; l'azotate de strontiane ne s'y dissout pas.

Deuxième groupe. — Première division.

YTTRIUM. — GLUCINIUM. — CÉRIUM.

Ces métaux, ainsi que leurs oxides, sont sans intérêt et n'ont point d'usage.

YTTRIUM.

L'*yttrium*, avec la potasse et l'ammoniac, donne naissance à un précipité d'yttria.

GLUCINIUM.

Le *glucinium* donne, avec l'ammoniac, un précipité blanc qui ne se redissout pas, tandis qu'avec de la potasse en excès le contraire a lieu. Ces deux caractères appartiennent également à l'aluminium, mais le carbonate d'ammoniac redissout le précipité, ce qui n'a pas lieu pour le glucinium.

CÉRIUM.

Le *cérium* donne, avec la potasse, un précipité blanc d'oxide de cérium hydraté. Ce précipité chauffé au rouge passe au brun.

Ammoniac. . . . . *précipité blanc.*

Carbonates alcalins. . . . *précipités blancs.*

Tous ces précipités sont insolubles dans un excès de réactif.

MAGNÉSIUM.

Les sels de magnésie ont une saveur salée et amère.

Avec l'ammoniac : *précipité blanc* dont la moitié forme un sulfate double ammoniaco-magnésien.

Phosphate de soude : *rien*, mais si on ajoute de l'ammoniac, il se forme un phosphate double.

Carbonate de soude : *rien*.

Bicarbonate de soude : *rien* à froid, mais si on chauffe, l'acide carbonique se dégage en partie, et il se précipite du carbonate de magnésie. Ce caractère suffit pour distinguer la magnésie des métaux tels que le calcium, le barium et le strontium, avec lesquels elle se rencontre souvent.

Le phosphate de soude ordinaire, avec un excès d'ammo-

niac, précipite en blanc les sels de magnésie; il en résulte un phosphate ammoniaco-magnésien insoluble. Si on calcine, on chasse l'ammoniac, et il reste du phosphate de magnésie qui sert à doser cette base.

Chauffée avec l'oxide de cobalt, la magnésie se colore en rose.

La baryte se sépare de la magnésie au moyen de l'acide sulfurique. Si on avait de la strontiane, on emploierait l'alcool qui dissout le sulfate de strontiane.

La chaux et la magnésie étant deux corps isomorphes, se rencontrent toujours ensemble. Pour les séparer, on convertit en sulfates. Le sulfate de chaux est insoluble dans une dissolution de sel marin; le sulfate de magnésie ne l'est pas. On filtre les liqueurs en ayant soin de laver avec les chlorures de sodium. On traite ensuite par l'alcool qui laisse le plâtre à l'état de pureté. Il faut prendre le sel marin exempt de magnésie: pour cela faire, on précipite cette dernière par le carbonate de soude, il se forme du carbonate de magnésie, le chlorure de sodium cristallise, et le chlorure de magnésium reste dans les eaux-mères.

ALUMINIUM.

Les sels d'alumine ont une saveur d'abord sucrée et qui devient aussitôt astringente. Ils ont tous une réaction acide sur les couleurs végétales. Avec la potasse et la soude, on obtient un précipité blanc qui disparaît par un excès d'alcali.

L'ammoniac forme aussi un précipité complet d'alumine, mais qui ne se dissout pas dans un excès d'ammoniac.

Les sulfates de potasse et d'ammoniac, en dissolutions concentrées, donnent naissance à un précipité blanc octaèdrique d'alun.

L'alumine calcinée avec le nitrate de cobalt, le colore en bleu et donne un produit connu sous le nom de *bleu Thénard*.

Quand l'alumine est unie à des matières insolubles dans l'eau et les acides, on emploie les alcalis. On mélange le corps à analyser avec du carbonate de soude ou de potasse (7 à 8 fois son poids) : il y a formation de silicate et aluminate solubles. Le corindon, ou alumine pure, est entièrement inattaquable par les carbonates alcalins. Dans ce cas, il faut recourir à l'action de la potasse caustique. On chauffe au rouge dans un creuset de porcelaine ou d'argent; on laisse refroidir et on reprend par l'eau qui dissout l'aluminate formé. Si on avait un résidu, on le traiterait par l'acide chlorhydrique. Le mélange de la potasse avec la matière doit être pulvérisé

avec soin dans un mortier d'agathe. On délaie dans l'eau, on recueille la poussière, et l'opération se répète plusieurs fois. On ajoute sept à huit fois le poids de potasse caustique.

Si l'alumine était mélangée avec de la baryte et de la strontiane, ces deux bases seraient précipitées par l'acide sulfurique.

Si on pèse 2 grammes d'alumine, on trouvera après la calcination une plus grande quantité de matière, cela tient à ce que l'alumine est très-difficile à laver, et qu'elle renferme des sels solubles; dans ce cas, il faut faire bouillir la liqueur et laver à l'eau chaude pendant près de deux heures.

MANGANÈSE.

Le manganèse se rencontre dans le fer, les fontes; il se trouve aussi à l'état de combinaison insoluble dans le verre à vitres, dans le cristal.

Pour le reconnaître, il faut avoir recours aux carbonates alcalins ou aux alcalis. Calciné avec un alcali, le manganèse se convertit toujours en manganésiate de potasse ou de soude.

Pour distinguer le manganèse, il faut le ramener à l'état de protoxide; on soumet le deutoxide formé à l'action de l'acide sulfureux. Il faut pour cela rendre la matière soluble : on y parvient en la traitant par un alcali; ou bien on chauffe à 100° dans une petite cornue avec de l'acide sulfurique concentré. On met 20 fois autant d'acide que de matière; l'excès sort de la cornue.

Les oxides de manganèse ne se trouvent pas à l'état de pureté dans la nature. Ils sont mêlés à des proportions variables d'une gangue formée de sesqui-oxide de manganèse, de quartz, de carbonate calcaire, de spath-fluor, de carbonate et de sulfate barytiqués.

Si on fait réagir l'acide chlorhydrique sur les oxides de manganèse, il se passera les phénomènes suivants :

Avec le protoxide :

$$MnO + HCl = MnCl + HO.$$

Avec le sesqui-oxide :

$$Mn^2O^3 + 3HCl = 2MnCl + 3HO + Cl.$$

Enfin avec le bi-oxide :

$$MnO^2 + 2HCl = MnCl + 2HO + Cl.$$

Aussi le volume de chlore qu'on peut retirer est toujours proportionnel au volume de l'oxigène que l'oxide renferme

au-delà du protoxide, ou, en d'autres termes, il se dégage un équivalent ou deux volumes de chlore, pour chaque équivalent ou volume d'oxigène, qui, dans l'oxide, est en excès sur celui qui renferme le protoxide formé avec le poids de métal.

Quand on place les oxides de manganèse sous l'influence d'acides capables de faire dégager l'oxigène, il se forme toujours des sels de protoxide, en sorte que l'oxigène dégagé est précisément celui qui est en excès sur le protoxide qui peut se former avec le métal. On reconnaîtra donc la richesse d'un oxide soit en dosant le chlore, soit en dosant l'oxigène.

On doit à M. Gay-Lussac deux procédés qui servent à faire cette analyse.

1° 3g.980 de bi-oxide de manganèse pur donnent 1 litre de chlore, par l'acide chlorhydrique, à la température de 0°, et sous la pression de 0.m76. Si, après avoir fait absorber ce litre de chlore par une dissolution de potasse ou de soude, ou de carbonate de ces bases, on ajoute de l'eau jusqu'à ce que le mélange occupe la capacité de 1 litre, on obtiendra une dissolution qui renfermera son propre volume de chlore. Si maintenant on fait dissoudre 4.g439 d'acide arsenieux (AzO^3) dans l'acide chlorhydrique, et qu'on ajoute de l'eau jusqu'à ce que le mélange contienne 1 litre, on aura une liqueur que M. Gay-Lussac a appelée *liqueur normale arsenieuse*, et qui pourra neutraliser un volume de chlore égal au sien, en passant à l'état d'acide arsenique, et en joignant ce chlore à l'hydrogène de l'eau qui a servi à l'oxidation, de sorte que des volumes égaux de cette liqueur et de la précédente pourront se neutraliser. Pour reconnaître si le chlore ajouté dans la dissolution arsenieuse a opéré toute la sur-oxidation, ou si lui-même est en excès, on fait usage d'une dissolution sulfurique d'indigo récemment préparée. Tant qu'il restera de l'acide arsenieux à transformer en acide arsenique, l'indigo, dont on versera quelques gouttes, ne sera pas altéré; mais aussitôt que la sur-oxidation sera terminée, une trace de chlore en excès détruira sa couleur. Si donc on ajoute maintenant à la liqueur normale arsenieuse, la liqueur renfermant le chlore qui aura été extrait de l'acide chlorhydrique par un poids de 3.g980 de l'oxide à essayer, on pourra, en connaissant le volume de cette dissolution, doser le chlore qui s'est dégagé, et par suite reconnaître le titre de l'oxide de manganèse.

Pour procéder à l'opération, on réduit en poudre fine 3.g980 de l'oxide à essayer qu'on enveloppe dans un morceau

de papier collé, et on l'introduit dans un ballon *a* qu'on bouche rapidement (*Pl.* IX, *fig.* 11).

Le papier a pour but d'empêcher l'acide chlorhydrique d'agir immédiatement. On porte à l'ébullition l'acide chlorhydrique, et au bout de cinq à six minutes, la décomposition de l'oxide de manganèse est opérée.

Le ballon *b* contenant une lessive alcaline a absorbé le chlore complètement. On retire la liqueur du ballon *b*, on lave avec de l'eau qui sert à compléter le litre : on a ainsi la liqueur d'essai. Dans un volume déterminé de liqueur normale arsenieuse dans laquelle on a mis quelques gouttes de sulfate d'indigo récemment préparé, on verse, à l'aide d'une pipette graduée, la liqueur d'essai, et on s'arrête au moment de la décoloration. Il est évident que s'il faut un volume de liqueur d'essai égal à celui de la dissolution arsenieuse pour opérer la décoloration, l'oxide est pur; s'il en faut deux fois plus, l'oxide est à $^{50}/_{100}$. Ce procédé est employé journellement dans les arts.

Dans son second procédé, M. Gay-Lussac reconnaît le titre de l'oxide en dosant l'oxigène. Mais il est peu employé ; outre qu'il est d'une exécution difficile, il est souvent peu exact, parce que les manganèses du commerce renferment du sesquioxide qui, en présence de l'acide sulfurique bouillant, ne laisse pas dégager d'oxigène.

Procédé de M. Berthier. — On lave l'oxide par un acide faible pour le débarrasser des carbonates qu'il pourrait renfermer. On dessèche au bain-marie. On pèse un poids déterminé qu'on fait bouillir avec de l'acide oxalique en excès (C^2O^3). Il y a formation de carbonate de protoxide par désoxidation du manganèse; mais l'excès de C^2O^3 le convertit en oxalate de protoxide, et l'acide carbonique se dégage.

Si on opérait sur du peroxide pur, on aurait en équivalents :

$$MnO^2 + C^2O^2 = MnO\,C^2O^4$$

Puis : $$MnOC^2O^4 + C^2O^3 = MnOC^2O^3 + 2\,CO^2.$$

De sorte que pour chaque équivalent de peroxide de manganèse pur qui se trouvera dans l'oxide à essayer, on aura un dégagement de quatre volumes d'acide carbonique. Au lieu de recueillir ce corps à l'état gazeux, on le fait passer sur de la baryte, ce qui donne lieu à du carbonate de baryte insoluble. On filtre, on dessèche et on pèse. Sa composition

conduit à connaître le volume d'acide carbonique absorbé; par suite, celui de l'oxigène dégagé, qui en est le quart, ou enfin le volume de chlore qu'on pourrait retirer de l'oxide par une quantité suffisante d'acide chlorhydrique.

Nous avons classé le manganèse dans les métaux de la première division du deuxième groupe, qui donnent une dissolution incolore. Mais généralement les dissolutions de manganèse sont d'un rose améthyse qui provient, d'après quelques chimistes, de la présence d'un sel de sesqui-oxide.

Par les alcalis fixes, les sels de protoxide donnent un précipité blanc; à l'air, il passe au jaune et finit par devenir noir.

Par la potasse, la précipitation est complète.

Par l'ammoniac, il n'y a pas de précipité si la liqueur est acide. Il y a formation d'un sel double ammoniaco-manganésien comme avec la magnésie.

Avec les carbonates alcalins : *précipité blanc de carbonate de manganèse*. Un bicarbonate dégage de l'acide carbonique.

Les phosphates précipitent en blanc dans des liqueurs très-étendues d'eau. C'est une bonne méthode pour séparer le manganèse.

Les sulfhydrates précipitent en couleur de chair.

Avec le cyanoferrure de potassium, *précipité blanc*, si le sel ne contient pas de fer, mais plus ou moins *bleu*, suivant la proportion de fer. On emploie le cyanoferrure de manganèse pour la confection du papier de sûreté. Avec un acide il passe au bleu. La potasse, le chlore et l'acide azotique marquent en brun.

Une combinaison quelconque de manganèse donne un caméléon avec la potasse à une température au-dessous du rouge sombre. Cette propriété est la plus caractéristique, mais il faut avoir soin de ne pas produire une température supérieure à celle du rouge sombre, car on pourrait confondre avec le caméléon de fer, qui se produit à une température élevée.

Le manganèse se sépare de la magnésie au moyen des sulfhydrates. Il se sépare de l'alumine en mélangeant le sel avec le chlorhydrate d'ammoniac, et on précipite avec promptitude, au moyen de l'ammoniac.

ZINC.

Le zinc donne naissance à deux oxides.

Le protoxide de zinc récemment calciné est phosphorescent dans l'obscurité, mais le phénomène dure peu d'instants.

Les sels de zinc ont une saveur métallique astringente. Ils produisent des vomissements.

Avec les carbonates de potasse et de soude : *précipité blanc floconneux de carbonate de zinc, insoluble dans un excès de réactif.*

Le carbonate d'ammoniac précipite en blanc, mais le précipité se redissout dans un excès de réactif.

La potasse, la soude et l'ammoniac donnent, dans les sels de zinc, un précipité de protoxide hydraté qui se redissout dans un excès de ces bases. Cette propriété est importante, car elle permet de séparer le zinc du fer.

Avec le cyanoferrure de potassium. . . . . *précipité blanc.*
Avec le cyanoferride de potassium. . . . . *précipité jaune sale.*

C'est le seul de tous les réactifs qui donne un précipité coloré.

L'hydrogène sulfuré ne précipite les sels de zinc que quand ils sont parfaitement neutres.

Le zinc se précipite à l'état de sulfure par le sulfhydrate d'ammoniac.

Quand on veut doser le zinc, c'est généralement par un excès de carbonate de potasse ou de soude qu'on le précipite de sa dissolution. Si on est obligé d'introduire de l'ammoniac dans la liqueur, elle pourra renfermer un dissolvant du zinc, alors la quantité de métal précipité pourra ne pas être le tout qu'on se propose d'obtenir. Dans ce cas, avant d'introduire le carbonate alcalin, on chauffe jusqu'à ce que la masse ne sente plus l'ammoniac. On reprend alors la dissolution et on précipite tout le zinc par le carbonate potassique ou sodique. Ce n'est pas du poids de ce carbonate qu'on déduit le poids du zinc ; car, pendant l'évaporation, l'acide carbonique s'échappe avec la vapeur aqueuse. On doit porter la température au rouge-blanc, et tout le carbonate se réduit alors en oxide de zinc, lequel est tout-à-fait fixe. C'est de ce poids qu'on déduit le zinc.

Pour séparer le zinc de l'alumine, on emploie l'ammoniac, ainsi que pour la chaux.

Pour la baryte et la strontiane, on se sert de l'acide sulfurique.

Pour la magnésie et le manganèse, on se sert de la potasse, ou mieux d'un courant de chlore. Le chlorure de zinc est vola-

til, et les chlorures de magnésium et de manganèse restent pour résidu.

Aucun métal ne précipite le zinc de ses dissolutions.

CADMIUM.

Tous les sels de cadmium sont incolores, à l'exception du chrômate, qui est jaune ; leur réaction est acide et leur saveur métallique, entièrement semblable à celle du zinc. Les alcalis fixes donnent un *précipité blanc*, gélatineux et insoluble dans un excès d'alcali.

Ammoniac.	*précipité blanc soluble dans un excès.*

c'est la même action que sur les sels de zinc.

Avec les carbonates alcalins, y compris celui d'ammoniac.	*précipité blanc de carbonate neutre de cadmium insoluble dans un excès de réactif.*

Cette propriété sert à séparer le zinc du cadmium. Le carbonate calciné donne un oxide brun.

Cyanure rouge.	*précipité jaune pur.*
Cyanure jaune	*précipité blanc, comme avec le zinc.*
Acide sulfhydrique. . . .	*précipité jaune qui précipite tout le cadmium.*

En contact d'une lame de zinc, le cadmium se précipite surtout quand les liqueurs sont légèrement acides.

Le cadmium est presque sans usage à cause de sa rareté. Allié au cuivre, il produit un laiton semblable à celui que donne le zinc.

Deuxième division.

FER.

Ce métal est répandu avec profusion dans les trois règnes de la nature. Il entre jusqu'à dix à douze centièmes dans le sang des mammifères, et dans les cendres de presque tous les végétaux.

Le fer, en s'unissant à l'oxigène, forme trois proportions différentes :

$Fe O$ et $Fe^2 O^3$, c'est le protoxide et le sesqui-oxide, et, de plus, un acide analogue à l'acide manganique ; sa formule est :

$Fe O^3$ acide ferrique.

Il existe aussi une combinaison du protoxide et du peroxide représentée par la formule :

$$Fe\,O^{4}/_{3}$$

En effet :

$$3\,Fe\,O^{4}/_{3} = Fe\,O + Fe^{2}\,O^{3}$$

L'oxide magnétique se prépare en faisant passer un courant de vapeur d'eau sur du fer divisé et chauffé au rouge ; ou bien on chauffe l'oxide rouge, ou peroxide, dans un creuset de platine après avoir arrosé la matière avec un peu d'huile ou du savon. Un autre procédé consiste à l'obtenir par voie humide. On mélange intimement un sel de fer au minimum et au maximum ; on dissout, et au moyen de la potasse que l'on verse goutte à goutte, on précipite les deux oxides qui se combinent. Le précipité lavé et desséché possède toutes les propriétés de l'aimant naturel.

La composition du fer magnétique se détermine au moyen de la première méthode qui sert à le préparer. On pèse une certaine quantité de fer bien pur et divisé ; après l'oxidation par la vapeur d'eau, la différence entre le poids du métal et celui de l'oxide formé donne la quantité d'oxigène qui y entre.

L'oxide magnétique existe en grande abondance dans la nature. On le rencontre en filons et en amas très-considérables.

Sels de fer. — Les sels de fer ont une saveur astringente. Ils ne sont pas vénéneux. On distingue les sels de fer au *minimum* et les sels au *maximum*.

Les *sels au minimum*, ou les sels de protoxide, en dissolution, ont presque tous une couleur verte tirant sur le bleu.

Avec la potasse, la soude, la chaux et la baryte. . .	*précipité blanc qui verdit et jaunit au contact de l'air*, c'est l'hydrate de peroxide.
Avec l'ammoniac.	*précipité incomplet, verdâtre, soluble dans un excès de réactif.*
Avec les carbonates solubles	*précipité blanc de carbonate de fer qui jaunit rapidement.*
Avec le cyanure jaune ($Fe\,Cy$, $2\,KCy$).	*précipité blanc verdâtre dont la composition est peu connue.*

Ce précipité devient bleu à l'air et passe à l'état de bleu de Prusse. Le chlore produit le même effet sur ces sels.

Avec le cyanure rouge ($Fe^{2}\,Cy^{3}$, $3\,Cy\,K$).	*précipité bleu.*

Avec une infusion de noix de galle, par exposition à l'air ou addition de chlore, il se forme un précipité de gallate et tannate de peroxide de fer.

Hydrogène sulfuré.	*rien.*
Sulfhydrate.	*précipités noirs.*
Succinates et benzoates. . .	*rien.*

Les *sels de fer au maximum* sont d'une couleur jaune brunâtre, quelquefois blancs quand ils sont desséchés.

Avec tous les alcalis. . . .	*précipité complet d'hydrate de peroxide de fer.*
Avec le cyanoferrure de potassium (cyanure jaune). .	*précipité de bleu de Prusse très-abondant.*
Avec le cyanoferride (cyanure rouge).	*rien.* Cependant la couleur se fonce légèrement.

Avec l'infusion de noix de galle, il y a formation de gallate et tannate de peroxide de fer.

Succinates et benzoates. . .	*précipité jaune ocreux.*
Avec le sel sulfocyanure de potassium.	*id.* *rouge de sang.*

ce qui n'a pas lieu dans les sels au *minimum.*

L'hydrogène sulfuré fait passer le sel au *minimum*, la dissolution devient laiteuse, et il se dépose du soufre. Cette réaction a pour formule, en équivalents :

$$Fe^2O^3(SO^3)^3 + HS = HO + S + 2\,FeSO^2 + SO^3$$

Pour doser le fer, il faut le ramener à l'état de peroxide.

Il y a plusieurs méthodes pour analyser des mélanges de protoxide et de peroxide de fer :

1° On prend un poids P de la substance à analyser; si on la réduit par l'hydrogène, P représente le poids du fer tant à l'état de protoxide qu'à celui de peroxide. On calcine P dans un creuset de platine avec de l'acide azotique pour peroxider toute la masse; P' donne le poids de l'oxigène nécessaire à cette transformation. En rapprochant les formules Fe O et Fe^2O^3 des deux combinaisons, $\frac{P'}{200}$ représente le nombre des équivalents de fer qui, dans le poids P, sont à l'état de protoxide; par suite $\frac{P}{339,210} - \frac{P'}{200}$ représente le nombre de ceux qui sont à l'état de peroxide.

2° On met 2 grammes de matière à analyser dans un flacon rempli d'acide carbonique qui a pour but de chasser l'air du vase, et, par suite, d'empêcher la sur-oxidation des sels au *minimum* qu'on obtiendra dans le flacon. On verse de l'acide chlorhydrique, il y a formation de protochlorure, de perchlorure et d'eau. On verse, quand toute la matière est entrée en dissolution, de l'acide sulfhydrique jusqu'à ce que la saturation soit complète. La réaction qui s'opère a pour formule :

$$Fe\,Cl^2 + HS = Fe^2\,Cl^2 + HCl + S.$$

On voit donc que pour chaque équivalent de soufre, la liqueur renferme un équivalent de perchlorure, ou primitivement un de peroxide. Il reste donc à évaluer le poids du soufre.

Les chlorures de fer dans l'eau jouent le rôle d'oxisels au *maximum* et au *minimum*, et on doit se rappeler que l'hydrogène sulfuré est sans action sur ceux-ci, et que les sels au *maximum* sont ramenés au *minimum*.

Marche de l'opération. — Filtrer la liqueur jusqu'à parfaite limpidité. Laver le précipité avec de l'eau étendue d'acide sulfhydrique. Laisser macérer le filtre pendant quelques heures dans l'eau régale. Le soufre passé à l'état d'acide sulfurique est précipité par le chlorure de barium. Filtrer de nouveau et laver. On retire le sulfate de baryte formé par l'addition de SO^3. Placer dans un creuset de platine, dont on connaît le poids, le filtre à peu-près desséché. On porte au rouge, et le sulfate se dessèche. Placer le creuset encore chaud sous une cloche dans laquelle on a desséché l'atmosphère. Peser rapidement; après le refroidissement on a le poids du sulfate, plus les cendres du filtre, par la différence du poids du creuset déjà pesé. On défalque ce dernier en grillant et pesant les cendres d'un filtre de même nature et même grandeur. La composition du sulfate de baryte donne le soufre cherché. Il faut aussi avoir soin, dans le grillage du filtre qui contient le sulfate de baryte, d'ajouter une goutte d'acide azotique, sans quoi le charbon du filtre pourrait faire passer une certaine quantité de sulfate à celui de sulfure.

3° On peut aussi faire usage du chlorure d'or. Le chlore de l'or se porte sur le protoxide et le fait passer à l'état de sesquichlorure, et l'or est précipité.

4° Ou bien encore en mettant dans le mélange de l'argent métallique. Le chlore du sesquichlorure se porte sur lui, et en le pesant après, l'excès de poids représente la quantité de chlore prise sur le sesquichlorure de fer.

Séparation du fer et du manganèse. — Comme le protoxide de fer et le protoxide de manganèse sont deux bases très-énergiques, qui précipitent en même temps de leurs dissolutions, ou ne précipitent ni l'une ni l'autre, on est obligé de suroxider le fer.

Quand le fer entre pour une proportion assez notable dans la masse à analyser, on emploie le procédé suivant (il est dû à M. Berzélius).: on dissout la masse de fer et de manganèse dans de l'acide chlorhydrique en excès; il y a formation de deux protochlorures solubles. On verse de l'eau de chlore, ou de l'acide azotique; on fait alors passer le sel de fer à l'état de protochlorure. On sature par l'ammoniac qu'on ajoute par petites portions, et on s'arrête lorsque la liqueur limpide se colore légèrement en jaune ocreux : c'est un peu d'oxide de fer précipité. A la température de 20 à 25°, on verse une dissolution bien neutre de succinate d'ammoniac : le fer est précipité à l'état de succinate de peroxide. On filtre et on calcine avec de l'acide azotique. Dans les eaux passées sous le filtre, on verse un carbonate alcalin, qui précipite le manganèse à l'état de carbonate. On recueille ce dernier, et on calcine fortement. Le résidu renferme le manganèse sous la forme d'oxide quatre tiers. A l'aide des équivalents, on détermine les poids du fer et du manganèse.

M. Herschel emploie un autre procédé : au mélange des chlorures, il ajoute un excès de carbonate de chaux. L'acide carbonique, en se dégageant, laisse la chaux qui se substitue au peroxide de fer qui se précipite. On filtre, et on recueille l'excès de craie et le peroxide. On fait digérer avec de l'acide sulfurique étendu; le fer et la chaux passent à l'état de sulfates. Dans les liqueurs claires, on verse de l'ammoniac qui précipite toute la chaux. Si on retranche le poids de la chaux du poids obtenu précédemment, on obtient le poids du peroxide de fer. Par un carbonate alcalin qu'on verse dans la liqueur mise à part, et qui contenait le chlorure de manganèse, on obtient facilement ce métal.

Analyse des fontes, des fers et des aciers.

Outre le fer et le charbon, ces corps peuvent renfermer, dans des proportions variables, du silicium, de l'aluminium, du calcium, du manganèse, du phosphore et du soufre. On attaque la matière à analyser (quelques grammes) par l'eau régale : il y a formation de chlorures qu'on évapore à siccité.

En reprenant plusieurs fois par l'eau et évaporant chaque fois, le chlorure de silicium, qui agit sur l'eau et donne de la silice, fait passer tout le silicium à l'état de silice. Pour rendre cette dernière tout-à-fait insoluble, on élève la température jusqu'à 300°. En reprenant par l'acide chlorhydrique, on reconstitue les chlorures, moins celui de silicium. On étend d'eau, et on filtre pour avoir la silice. On grille le filtre; en défalquant les cendres, on a le poids de la silice, et par suite celui du silicium. Ce procédé est très-exact pour doser le silicium contenu dans un minéral.

Pour doser le *charbon*, M. Gay-Lussac emploie le procédé suivant: un tube de porcelaine traverse un fourneau à réverbère; à l'extrémité du tube s'adapte une petite cornue, dans laquelle on a mis quelques grammes de chlorate de potasse fondu. A l'autre extrémité, on adapte un tube propre à recueillir les gaz. On concasse une petite quantité de la fonte qu'on mêle avec six ou huit fois son poids d'oxide de mercure. On triture de manière à rendre le mélange bien intime, et on l'introduit dans une petite capsule cylindrique en platine, et fermée à ses bases. On enlève une petite partie de la surface cylindrique, et on introduit cette petite capsule dans le tube de porcelaine, sensiblement au milieu, et on fait arriver dans le mercure le tube propre à recueillir les gaz sous une cloche graduée, d'une capacité convenable. On élève graduellement la température du tube de porcelaine; l'oxide de mercure se décompose, le métal se rend dans la cuve, et l'oxigène sert à brûler en partie le charbon de la fonte, et le résultat est de l'acide carbonique. Pour achever de brûler le charbon, on fait agir le chlorate de potasse; l'oxigène chasse tout l'acide carbonique qui se trouve dans le tube de porcelaine, et le gaz se rend dans la cloche graduée. En agitant avec une lessive concentrée de potasse, la diminution dans le volume exprime l'acide carbonique, et par suite le poids de charbon demandé.

Ce procédé est très-exact. Deux heures suffisent pour achever une opération semblable.

M. Regnault emploie, pour brûler le charbon, le chrômate de plomb ($PbO\,CrO^3$), qui, par la chaleur, cède de l'oxigène en laissant pour résidu de l'oxide de plomb et de l'oxide de chrôme (CrO). Le principe est donc le même.

M. Berzélius dose le charbon en nature. Il fait digérer un poids connu de la fonte, réduite en poudre fine, avec un

ichlorure de cuivre (Cu Cl) : il y a formation de protochlorure e fer, et le cuivre se précipite en même temps que le charon du carbure. Il faut donc séparer ces deux matières; ce qui se fait en décantant la liqueur, et en versant sur le mélange de cuivre et de charbon un excès de bichlorure de cuivre un peu acidulé. Le cuivre alors se redissout, et donne un protochlorure soluble à la température de 50°. Reste donc e charbon. On le lave et on le sèche à l'étuve; une fois sec, on le pèse, et son poids, moins celui du filtre, donne la quantité de charbon contenue dans la fonte.

Dosage du phosphore. — On le convertit en acide phosphorique. Ainsi, une fois la silice enlevée, on fait une nouvelle dissolution, dans laquelle on verse un excès de carbonate soluble, tel que celui de soude. Le fer est alors précipité à l'état de peroxide; le manganèse, à l'état de carbonate, et le phosphore qui, sous l'influence de l'eau régale, est passé à l'état d'acide phosphorique, donne un précipité de phosphate tribasique de fer. On recueille ce précipité, on le lave, et, avec deux ou trois fois son poids de potasse, on l'attaque à une température élevée, dans un creuset d'argent. Le phosphate passe à l'état de phosphate alcalin soluble. On reprend par l'eau bouillante. On filtre quand la liqueur est bien incolore; sans quoi elle pourrait retenir un peu de caméléon formé par l'attaque précédente. Le filtre contient les oxides de fer et de manganèse qu'on sépare, et la liqueur restante contient tout l'acide phosphorique; on sature avec de l'ammoniac, et on précipite au moyen du chlorure de calcium, et le poids du phosphore formé donne celui du phosphore.

NICKEL.

Les dissolutions des sels de nickel ont toujours une couleur verte. Elles provoquent des vomissements. Avec les alcalis fixes, *précipité vert-pomme*, insoluble dans un excès de réactif.

L'ammoniac donne une même couleur, mais le précipité disparaît, et la liqueur se colore en bleu. On pourrait confondre avec le cuivre, mais l'acide sulfhydrique précipite le cuivre.

La teinte des sels de nickel est semblable à celle de fer au *minimum*; mais ces derniers passent au *maximum* et jaunissent, ce qui n'a pas lieu pour le nickel.

Avec le cyanure jaune, *précipité vert sale.*

Le nickel est toujours uni au cobalt.

Pour l'en séparer, on emploie un sulfo-arseniure de cobalt et de nickel, qui contient, en outre, du zinc, du cuivre, du plomb, du fer et de l'antimoine. On grille; le soufre et l'arsenic disparaissent en partie, et on attaque par l'eau régale. Ces métaux sont convertis en chlorures, et le soufre et l'arsenic qui restaient passent à l'état de sulfates et d'arseniates. On précipite alors le cuivre, le plomb et l'antimoine à l'état de sulfures, au moyen de l'acide sulfhydrique. Un carbonate alcalin en excès précipite le fer à l'état de peroxide; le cobalt et le nickel, à l'état de carbonates. L'acide oxalique qu'on verse sur ce précipité dissout le peroxide de fer, et convertit les carbonates en oxalates insolubles dans un excès d'acide. On fait dissoudre dans l'ammoniac, et on abandonne la liqueur à elle-même. L'oxalate de nickel se dépose par suite de l'évaporation de l'ammoniac. Par la calcination, on obtient l'oxide, qu'on réduit à l'état métallique par le charbon ou l'hydrogène.

On sépare aussi le zinc du nickel, en évaporant à sec la dissolution dans l'eau régale; on chasse ainsi l'excès d'acide. On redissout dans l'eau, et on ajoute de l'acide acétique. On fait ensuite passer un courant d'hydrogène sulfuré dans la liqueur, et le zinc se précipite en entier sans entraîner le nickel.

COBALT.

La couleur des sels de cobalt est le rose ou grenat quand ils sont solubles, et tire sur le lilas quand ils ne le sont pas.

Avec les alcalis fixes : *précipité bleu.*

Avec l'ammoniac: *couleur acajou.* Le précipité se redissout dans un excès d'alcali.

Cyanure jaune : *vert sale.*

L'acide sulfhydrique ne précipite pas les sels de cobalt si les dissolutions sont acides, mais à l'état neutre il se forme un précipité léger de sulfure de cobalt (CoS).

Le cobalt colore en bleu le borax chauffé au chalumeau; on doit d'abord former une perle de borax sur un petit crochet de platine.

Le protochlorure de cobalt est employé dans le commerce sous le nom d'*encre sympathique.*

Il se prépare par l'action directe de l'acide chlorhydrique sur le protoxide de cobalt.

Quand les sels de ce métal sont en dissolutions chaudes et étendues, ces dernières sont bleues, et deviennent d'un rose

sible par le refroidissement. Ainsi, si on écrit avec cette dissolution à la température ordinaire, le papier ne présente aucuns caractères lisibles ; mais quand on les chauffe doucement à la flamme d'une bougie, ils deviennent bleus. Si on élevait trop la température, le protochlorure passerait au sesquioxide par décomposition, et les caractères en devenant noirs ne disparaîtraient plus.

Troisième groupe. — Première division.

MERCURE.

Les sels de mercure sont réductibles par le zinc, le plomb, l'étain, et principalement le cuivre. En chauffant la lame sur laquelle le mercure s'est déposé, il s'évapore.

Le protochlorure d'étain versé dans un chlorure de mercure se change en bichlorure.

Lorsque le mercure est à l'état de bichlorure, lequel est soluble, il se change d'abord en protochlorure insoluble, ce qui donne lieu à un précipité blanc. Une nouvelle quantité de sel d'étain réduit ce protochlorure à l'état métallique.

Avec un sel de protoxide, la potasse donne un précipité noir ainsi qu'un sulfhydrate.

Iodure de potassium : vert, qui passe au jaune et au rouge ; c'est le proto-iodure de mercure qui est très-peu stable. Un excès d'iodure précipite le mercure à l'état métallique ; le bi-iodure reste en dissolution.

Chrômate de potasse : précipité d'un brun-rouge de chrômate de protoxide.

Le sel marin donne un précipité de protochlorure insoluble. Il se distingue du chlorure d'argent, en ce que l'ammoniac, au lieu de le dissoudre, le fait passer au noir. L'acide azotique dissout le chlorure de mercure, et non celui d'argent.

Le chlorure de potassium, dans un chlorure de mercure, précipite du mercure métallique et convertit le sel en bichlorure.

Avec les sels au *maximum*, les alcalis fixes produisent un précipité jaune de bi-oxide hydraté.

L'ammoniac donne un précipité blanc, mais d'une nature compliquée.

L'acide sulfhydrique et les *sulfures :* précipité jaune au blanc, suivant les proportions. Si le réactif est en excès, le précipité est noir ; c'est du bisulfure hydraté.

L'acide chlorhydrique ne trouble pas la liqueur : il y a formation de bichlorure qui est très-soluble.

Chrômate de potasse : précipité rouge.

Dosage du mercure. — On place dans un tube A (*Pl. IX, fig.* 12) réfractaire, un poids connu du mélange avec de la chaux ou de la potasse. A l'extrémité fermée du tube A on a eu soin d'introduire du bicarbonate de soude ou de potasse. On chauffe au moyen d'un gril; l'alcali déplace l'oxide de mercure, et les vapeurs mercurielles viennent se condenser dans le tube à boule B. Quand on juge le dégagement terminé, on chauffe l'extrémité du tube A qui renferme le bicarbonate; l'acide carbonique, en se dégageant, entraîne avec lui toutes les vapeurs de mercure renfermées dans l'appareil, et les amène en B. On recueille ainsi le métal que l'on pèse.

Une combinaison de mercure est toujours réduite en la chauffant fortement avec du fer.

On peut exposer aussi la matière à essayer sur un corps quelconque chauffé au rouge. En exposant aussi près que possible une lame d'or polie, s'il y a du mercure, la lame blanchit aussitôt.

On dose encore le mercure en le précipitant de ses dissolutions au moyen du protochlorure d'étain. On fait bouillir la liqueur avec un excès d'acide chlorhydrique, et on ajoute du protochlorure d'étain récemment fait. Le mercure se réduit. On chauffe jusqu'à l'ébullition. On obtient ainsi un globule unique que l'on pèse. On doit bien le sécher à l'air.

Le mercure est facile à séparer des autres métaux à cause de ses caractères tranchés.

On peut avoir à doser le protoxide et le bi-oxide.

On étend les liqueurs d'eau, et on ajoute un excès de sel marin, de manière à précipiter le sel de protoxide. On filtre de suite pour éviter la conversion en sublimé corrosif.

On trouve dans le commerce du mercure allié au bismuth qui conserve sa fusibilité; mais quand on l'abandonne à lui-même, il y a formation d'une poudre noire.

Le vermillon, ou bisulfure de mercure, est fraudé dans le commerce; on le mélange souvent avec des matières fixes. On distille alors; le sulfure se volatilise. Si ce sont des matières organiques, on dissout dans l'alcool.

Le genre *mercure* ne renferme que huit espèces, qui sont :

1° Le mercure métallique;

2° Le sulfure simple ou cinabre;

se trouvant à Idria, Almaden en Espagne, au Pérou et au Japon.

3° Le protosulfure zincifère;

4° Le deutosulfure zincifère ;
se rencontrant à Calebraz au Mexique.
5° Le séléniure ; — il a été découvert au Hartz, par M. Zincken.
6° Le protochlorure ; — très-rare. Se rencontrant en grains cristallins disséminés dans les minerais de cinabre.
7° L'iodure ; — découvert au Mexique, par M. Del-Rio.
8° L'amalgame d'argent.

ARSENIC.

Les combinaisons métalliques arseniées sont :

1° Les arseniures ;
2° Les arseniates ;
3° Les arsenites.

Arseniures. — Ils ont tous l'éclat métallique, et sont en général très-fusibles. Soumis au grillage, ils exhalent une odeur d'ail très-prononcée ; il se dégage de l'acide arsenieux, et il se forme des sous-arseniates.

L'acide nitrique concentré et bouillant change les arseniures en arseniates. L'eau régale agit plus promptement.

Dans les arseniures correspondant aux oxides, la quantité d'arsenic est à la quantité d'oxigène : : 4,7004 : 1,0000.

Arseniates. — Le charbon les réduit tous ; il se dégage de l'arsenic.

Les arseniates métalliques sont insolubles dans l'eau ; mais ils se dissolvent dans les acides forts ; l'hydrogène sulfuré précipite l'arsenic à l'état de sulfure, de leurs dissolutions.

Dans les arseniates neutres, la quantité d'oxigène de la base est à la quantité de l'oxigène de l'acide : : 2 : 5, et par conséquent à la quantité d'acide : : 2 : 14,4008 : : 11 : 7; 2004 d'acide saturent une quantité de base qui contient 13,88 d'oxigène.

Arsenites. — Les arsenites sont très-peu permanents. Par la chaleur ils abandonnent pour la plupart une grande quantité d'acide arsenieux. Par le grillage, ils se changent en arseniates, ainsi qu'à l'aide de l'acide nitrique et l'eau régale. Ils sont réduits par le charbon, — insolubles dans l'eau ; — l'hydrogène sulfuré précipite l'arsenic de ses dissolutions à l'état de sulfure. Ici la précipitation a lieu instantanément, tandis que pour les arseniates, on doit attendre quelques moments, ou bien chauffer la liqueur avec de l'acide chlorhydrique.

Préparation de l'arsenic. — Pour avoir de l'arsenic pur et qui puisse se conserver longtemps sans altération, on prend 92 à 125 grammes (3 à 4 onces) d'arsenic du commerce qu'on introduit dans une fiole à médecine dont l'ouverture est fermée avec un bouchon de craie. On chauffe au bain de sable, et au bout d'une heure, environ, tout l'arsenic se sublime et se dépose dans le col de la fiole. L'opération marche d'elle-même et ne produit aucune vapeur incommode.

Analyse des matières arsenicales. — Nous avons vu que pour rechercher la présence de l'arsenic dans les cas d'empoisonnement, il fallait convertir ce corps en hydrogène arseniqué. Ce gaz brûle avec une flamme blanche et dépose de l'arsenic très-divisé. Une seule bulle introduite dans une éprouvette suffit pour former un dépôt très-abondant. Avec le sulfate de cuivre, il y a formation d'arseniure de cuivre qui est noir. En contact avec du chlore, il y a production d'un dépôt brun d'arsenic et d'acide hydrochlorique.

Appareil de Marsch. — Dans les analyses légales, on emploie un appareil qui porte le nom de son inventeur, c'est l'appareil de Marsch.

Après avoir carbonisé les matières organiques, telles que le foie, le cœur, etc., on introduit le produit de l'incinération dans un flacon, où on a préalablement placé du zinc, de l'eau et de l'acide sulfurique. L'hydrogène en se dégageant se porte sur l'arsenic, et forme de l'hydrogène arseniqué; ce gaz dépose de l'arsenic en brûlant à l'extrémité d'un tube effilé, et dont le jet est dirigé sur une petite capsule en porcelaine.

L'opération doit être conduite avec beaucoup de précaution, car le zinc du commerce contient lui-même de l'arsenic.

Voici comment on opère : les matières sont introduites dans le premier flacon tubulé A (*fig.* 13); après la première réaction, le gaz est lavé dans un second flacon B, où il dépose une partie des matières étrangères qu'il a entraînées avec lui. Il passe ensuite dans un tube C, sur de la mousse d'amiante, qui retient tout le zinc; et si, en enflammant le gaz à l'extrémité du tube effilé D, on recueille des taches sur la capsule E, elles ne seront dues qu'à l'arsenic.

Imperfection de cette méthode. — Cette méthode a plusieurs imperfections : 1° l'air des vases et l'hydrogène qui se dégage constituent un mélange détonnant qui peut produire la

upture des vases ; 2° la mousse abondante qui se développe nvahit le tube, et rend impossible toute opération ultérieure ; 3° si la flamme n'a qu'une faible intensité, ou quand 'orifice du tube est irrégulier, les taches déjà déposées sur la porcelaine disparaissent par l'effet de la volatilisation de l'arsenic ; 4° le zinc du commerce renferme toujours de l'arsenic, et le zinc provenant de la réduction de l'oxide pur n'a pas la propriété de décomposer l'eau.

Plusieurs mémoires ont été présentés à l'Académie, concernant l'emploi du procédé de Marsch, et les commissaires, MM. Dumas, Thénard, Boussingault et Regnault, rapporteurs, chargés d'examiner ces mémoires, ont adopté l'appareil suivant, qui est dû à MM. Berzélius et Liebig, et reproduit, avec plusieurs améliorations, par MM. Kœpplin et Kampmann (*fig.* 14).

Le flacon A (*fig.* 14) doit contenir la liqueur à essayer; il laisse un vide du cinquième environ de la capacité totale. On introduit dans ce flacon des lames de zinc, une couche d'eau et de l'acide sulfurique. Le gaz hydrogène en se dégageant chasse l'air du flacon. On porte alors au rouge le tube E, qui est entouré de clinquant. Un petit écran G empêche le tube de s'échauffer à une distance trop grande. On introduit la liqueur à essayer par le tube B, d'un centimètre (5 lignes) de diamètre, au moyen d'un entonnoir, qui a pour but de faire descendre le liquide le long des parois du tube, afin d'éviter que l'air ne soit entraîné dans le flacon. Si le dégagement du gaz se ralentit, on ajoute une petite quantité d'acide sulfurique, et on fait marcher l'opération doucement, et aussi régulièrement que possible. L'arsenic vient se déposer sous forme d'anneau en avant de la partie chauffée du tube. On peut mettre le feu à l'extrémité F, et recueillir des taches sur une capsule de porcelaine.

Pour condenser les dernières portions d'arsenic, on peut également recourber le tube, et faire plonger son extrémité dans une dissolution de nitrate d'argent : celle-ci se colore en brun, et la précipitation de l'argent à l'état métallique, par tout l'arsenic, reste dans la dissolution à l'état d'acide arsenieux. On précipite l'excès d'argent par l'acide chlorhydrique; on filtre et on traite la liqueur par les réactifs. Quand on a recueilli le métal qu'on suppose être de l'arsenic, on s'assure 1° de sa volatilité ; 2° de son changement en une poudre blanche volatile, qui est l'acide arsenieux ; 3° de son passage à l'état

d'acide arseniqué, en chauffant un peu d'acide azotique dans le tube : la liqueur évaporée à sec donne un précipité rouge-brique, en y versant du nitrate d'argent bien neutre ; 4° on peut, après ces épreuves, convertir l'arsenic de nouveau à l'état métallique : pour cela, dans le vase qui a servi à la précipitation par le nitrate d'argent, on ajoute une petite quantité de flux noir; on dessèche la matière, qu'on introduit dans un tube effilé M (*fig.* 15), dont une des extrémités est fermée à la lampe, après l'introduction de la matière; on la fait tomber dans la partie évasée, où on chauffe au rouge : l'arsenic passe à l'état métallique, et vient former, dans la partie étroite du tube, un anneau qui présente tous les caractères physiques de l'arsenic, quand bien même il n'existe que des quantités très-petites de cette substance.

Ce procédé rend facilement sensible $^{1}/_{1000000}$ d'acide arsenieux existant dans une liqueur; des taches commencent même à paraître avec une liqueur renfermant $^{1}/_{9000000}$ environ. Il y a avantage à concentrer la liqueur sur laquelle on opère ; les taches se montrent d'une manière beaucoup plus intense.

Il est aussi de la plus haute importance d'interposer sur le passage du gaz un tube D, de 3 décimètres (11 pouces) au moins de long, rempli d'amiante ou de coton, pour retenir les gouttelettes de la dissolution que le gaz entraîne toujours : sans cette précaution on obtiendrait des taches d'oxisulfure de zinc, qui présentent l'aspect des taches arsenicales.

Le nitrate d'argent est aussi troublé par des gaz non arsenicaux mélangés à l'hydrogène, et même par l'hydrogène seul : il faut donc bien se garder de conclure la présence de l'arsenic à l'inspection de ce caractère. On peut remplacer la dissolution de nitrate d'argent par une dissolution de chlore ou d'un chlorure alcalisé.

Nous avons dit que le zinc du commerce pouvait contenir de l'arsenic; cependant on peut en rencontrer qui en soit exempt. Dans tous les cas, il est indispensable de s'en assurer, et l'expert devra répéter, dans l'expérience de contrôle, sur les réactifs seuls, toutes les opérations qu'il a faites dans l'expérience véritable.

Il est de la plus haute importance que la carbonisation de la matière soit complète, sans quoi la liqueur peut donner des taches qui présentent quelquefois l'aspect des taches arsenicales, et que M. Orfila a nommées *taches de crasse*.

Quant à l'arsenic normal, qu'on disait exister dans la chair et les os des animaux, MM. Danger et Flandin ont reconnu, par des analyses exactes, que ces assertions étaient erronées. Les taches que fournissent, avec l'appareil de Marsch, les matières animales, ne sont que l'effet d'une réaction des sulfites et phosphites ammoniacaux, sur une huile volatile organique, sous l'influence d'une force électro-chimique.

TELLURE.

Ce métal offre des caractères peu importants.

BISMUTH.

Ce métal est d'un blanc gris, un peu rougeâtre, très-éclatant; sa pesanteur spécifique est représentée par 9,822; il fond à la température de 247, et est très-volatil.

Sels de Bismuth.

Les sels solubles sont peu stables; la plupart sont décomposés par l'eau; ils sont presque tous incolores.

Les alcalis donnent un. . .	*précipité blanc.*
Avec le carbonate de potasse	*précipitation complète.*
Avec le carbonate de chaux	*précipité complet, même à froid.*
Hydrogène sulfuré et les hydrosulfates.	*id. noir.*
Prussiate de potasse jaune. .	*id. blanc.*
Prussiate rouge.	*id. jaune-brun.*
Phosphates alcalins. . . .	*id. blanc.*
Chrômate de potasse. . . .	*id. jaune.*

En chauffant un des oxides de bismuth au chalumeau, à la flamme de réduction, on obtient un culot très-cassant.

Le bismuth se rencontre dans la nature sous plusieurs états :

Bismuth natif; — oxide de bismuth; — sulfure; — sulfure cuivreux; — sulfure plombo-cuivreux; — sulfure plombo-argentifère; — le *tellurure; —* l'*arseniure; —* et le *phospho-silicate.*

C'est presque toujours sous l'état de bismuth natif qu'on rencontre ce métal. Il est en masses lamellaires, ou cristallisé en petites lames quarrées ou en petits cubes. Il contient toujours un peu d'argent et un peu d'arsenic.

Il se rencontre dans plusieurs localités de la Saxe, de la Bohême, de la Carinthie, de la Suède et de la Norwège.

En Angleterre, on le trouve dans les mines de Redruth et de Carruck.

Pour purifier le bismuth du commerce, on le fond au contact de l'air, en agitant sans cesse la surface du bain : le soufre, l'arsenic et tous les métaux oxidables se séparent. Pour lui enlever l'argent, on passe le métal à la coupellation, puis on fait fondre le bouton pulvérisé avec du flux noir et du borax. L'opération de la coupellation doit être répétée plusieurs fois, si on veut obtenir du bismuth bien exempt d'argent.

PLOMB.

Ce métal est un des plus anciennement connus. Sa pesanteur spécifique, lorsqu'il est parfaitement pur, est de 11,445 ; celle du plomb du commerce est de 11,3522. Le plomb entre en fusion à la température de 334°, et il se volatilise lorsqu'on le chauffe plus fortement.

Sels de plomb.

La potasse donne un *précipité de protoxide hydraté*, soluble dans un excès d'alcali : c'est un plombate soluble.

Ammoniac.	*précipité blanc, insoluble dans un excès.*
Carbonate alcalin.	*précipité blanc.*
Phosphate.	*id. id.*
Oxalate.	*id. id.*
Cyanure jaune	*id. id.*
Acide sulfhydrique. . . .	*id. noir.*
Chrômates.	*id. jaune.*
Iodure.	*précipité jaune un peu soluble dans l'eau bouillante.*

Le zinc ramène le plomb à l'état métallique.

Si on fond au chalumeau ce métal, on obtiendra un bouton malléable, tandis que le bismuth donne un bouton cassant.

Quel que soit son état de combinaison, le plomb est toujours attaquable par l'acide azotique, à moins cependant qu'il ne soit combiné avec un grand excès d'acide, comme dans le cristal.

Dans ce cas, on emploie les carbonates alcalins (5 ou 6 fois son poids). On le ramène à l'état métallique en le chauffant dans un creuset avec du flux noir ; mais, comme le plomb est volatil, il faut éviter de chauffer trop fortement.

Le plomb donne naissance à quatre oxides, dont un seul jouit du rôle de base solifiable, c'est le protoxide ou massicot ; les autres oxides sont : le suboxide, le minium et le peroxide ou oxide puce.

Dosage du plomb.

On sépare le plomb par trois méthodes : 1° par les carbonates ; 2° par les oxalates ; 3° par les sulfates. Tous ces réactifs donnent des précipités blancs. On lave ces précipités, et on calcine pour chasser tous les produits volatils. Dans les deux premiers cas, l'acide carbonique se dégage ; dans le troisième cas, on ajoute de l'acide azotique, pour reconstituer le sulfate qui pourrait avoir été décomposé par les cendres du filtre. On rassemble, autant que faire se peut, la matière au fond du filtre, et on calcine ce dernier dans une capsule de porcelaine.

Si le plomb se trouve mêlé à la strontiane ou à la chaux et à la baryte, on précipite par le sulfure de barium. Pour avoir le sulfure de barium, on calcine le sulfate de baryte avec du charbon et on dissout dans l'eau. Le plomb mêlé d'un peu d'oxide devient âpre; pour le ramener à l'état de pureté, on le fond dans un creuset brasqué ou dans un courant d'hydrogène.

Plomb du commerce.

Le plomb du commerce contient du cuivre, de l'antimoine, quelquefois de l'arsenic et même de l'argent. On reconnaît facilement la présence de tous ces corps en dissolvant la matière à analyser dans l'acide azotique. Le plomb de chasse contient toujours 0,005 d'arsenic ; sa fabrication ne peut s'effectuer sans la présence de ce dernier métal. Les caractères d'imprimerie contiennent, par cette même raison, une certaine proportion d'antimoine. Le cuivre colore les oxides de plomb et le rend lui-même aigre. Dans la litharge ou protoxide de plomb *fondu* que l'on obtient dans les usines où l'on soumet le plomb à la coupellation pour en extraire l'argent, on retrouve les mêmes phénomènes que dans le plomb lui-même, et de plus on y rencontre de la silice et de la chaux.

Le minium peut renfermer tous les corps énoncés ci-dessus. Dans le commerce on connaît plusieurs variétés de minium. On le trouve pur ou en mélange avec du protoxide de plômb. Pour accuser sa présence, on fait bouillir le minium dans de la potasse caustique qui dissout le protoxide.

Le chrômate de plomb, si riche en couleur, est employé dans la fabrication du papier, où il entre pour $^{1}/_{200}$.

La céruse est du carbonate de protoxide de plomb. Dans le commerce on trouve des céruses qui contiennent des sulfates de

plomb et de baryte. Pour reconnaître la présence de ces corps, on plonge le tout dans l'acide nitrique qui dissout le carbonate de plomb, tandis que les sulfates restent pour résidu. M. Dumas a trouvé aussi des céruses qui ne contiennent même pas de carbonate de plomb. Pour reconnaître cette fraude, on dissout dans l'acide azotique qui ne doit pas dégager de l'acide carbonique, dans le cas où le sel à analyser ne contiendrait pas de carbonate. Dans ces moyens d'essai, on ne doit pas mettre un excès d'acide, car l'azotate de plomb n'est pas soluble.

Essais des minerais. — Ce sont ordinairement des sulfures de plomb, lesquels, soumis à l'analyse, donnent la quantité de plomb et corps étrangers unis au métal. Il y a plusieurs méthodes d'essai.

1° *Par voie sèche.* — On emploie le carbonate de potasse et la limaille de fer : il y a formation d'un sulfure de fer. Par le refroidissement, le plomb se réunit au fond du creuset, dessus se trouve le sulfure de fer, ensuite la scorie renfermant le carbonate de potasse et les matières terreuses. Comme il se volatilise une certaine quantité de plomb, il faut répéter plusieurs essais, mais l'analyse doit être faite préalablement sur un sulfure de plomb pur dont on connaît la quantité de plomb volatilisée.

2° *Par voie humide.* — On réduit le minerai en poudre fine, et on le traite par l'acide azotique étendu à froid. L'azotate de plomb se produit, et le soufre est mis en liberté. La calcination du soufre laisse la gangue. Si on faisait bouillir avec l'acide, la méthode d'analyse se compliquerait, car il y aurait formation de sulfate de plomb et de soufre libre.

Pour clarifier les eaux-de-vie, on a employé l'acétate de plomb : dans ce cas, la présence du plomb est toujours facile à reconnaître, car aucune matière organique ne saurait masquer la présence de ce métal.

Les sels de plomb, pris à l'intérieur du corps, donnent lieu à de fortes coliques connues sous le nom de *coliques de plomb.*

Gisement du plomb. — On a rencontré le plomb dans tous les terrains, mais il se trouve plus fréquemment dans les grès et les calcaires qui recouvrent immédiatement le terrain houiller. Les espèces minérales qui en renferment sont les suivantes : le massicot, le minium, l'oxichlorure, l'aluminate, les sulfures, le sulfate, les séléniures, les tellurures, les chloro-phosphates, les chloro-arseniates, l'arseniure, le carbo-

nate, les sulfo-carbonates, le chloro-carbonate, les chrômates, le vanadate, le tungstate, le molybdate.

ARGENT.

L'argent est un métal qui a été connu dès la plus haute antiquité. Sa densité est de 10,474 ; il est mou. C'est, après l'or, le métal le plus ductile. Un gramme d'argent peut se transformer en un fil de 2500 mètres de longueur et même au-delà. L'argent cristallise en octaèdres, en cubes. Il entre en fusion à une température de 22° du pyromètre, ou de 999° centigrades. Il est peu volatil.

L'argent donne naissance à trois oxides, dont un seul est salifiable. Il a pour formule ag o. Les deux autres, le sous-oxide et le peroxide, sont représentés par ag^2o et $ag o^2$.

Sels d'argent.

Les sels d'argent sont ordinairement incolores, s'ils sont neutres; et jaunes quand ils sont basiques.

Avec les alcalis fixes .	*précipité*	*couleur olive.*
Avec les phosphates . .	*id.*	*id. jaune.*
Avec les arseniates. . .	*id.*	*brun-rougeâtre.*
Avec les arsenites . . .	*id.*	*id. jaune.*
Cyanoferrure de potassium.	*id.*	*id. blanc.*
Cyanoferride.	*id.*	*id. jaune de rouille.*
Chrômates	*id.*	*id. jaune.*
Ammoniac et chlorates . .	*rien.*	

Le caractère le plus sensible est le précipité de chlorure d'argent, par addition d'acide chlorhydrique. Ce caractère est sensible, lors même que le sel d'argent est dissous dans six cent mille fois son poids d'eau. Ce chlorure, de consistance caillebotense, lorsque les liqueurs sont concentrées, doit se dissoudre complètement dans l'ammoniac.

Le cuivre réduit l'argent sous forme de cristaux. Le zinc précipite aussi l'argent de ses dissolutions sous forme de poudre noire.

Dosage de l'argent. — On emploie plusieurs méthodes. Si l'argent est libre, on amalgame avec le mercure, et on passe au travers d'une peau de chamois; le mercure en excès s'écoule, et par la distillation de l'amalgame le mercure se volatilise.

Quand l'argent est en dissolution, on le sépare à l'état de chlorure ; à l'état d'alliage, on dissout dans l'acide azotique. Quand il est combiné avec des substances inattaquables par

l'acide azotique, on a toujours recours à l'emploi du flux noir que l'on mêle avec la substance bien broyée. On fond dans un creuset, et l'argent se trouve ramené à l'état métallique. Il est convenable d'ajouter une ou deux parties de borax pour une ou deux de flux pour empêcher que le flux n'attaque le creuset.

L'argent se dose toujours à l'état de chlorure; on le lave et on le fond. Ce résidu est dissous dans du sel marin en excès, évaporé ensuite jusqu'à siccité. On ajoute de l'acide azotique qui décompose le sel marin et les chlorures en excès, sans toucher au chlorure d'argent. On lave et on filtre.

Alliages. — Le plus important des alliages d'argent, est celui qu'il forme avec le cuivre. Il constitue tous les objets d'argenterie et les monnaies. Tous ces alliages sont blancs, renfermeraient-ils la moitié de leur poids de cuivre; leur couleur cependant n'est jamais aussi belle que celle de l'argent pur.

Les titres des alliages autorisés en France par la loi, sont les suivants :

Monnaie d'argent.	0,100 de cuivre.
Monnaie de billon.	0,800
Vaisselle.	0,050
Bijoux.	0,200
Soudure	0,120 à 0,330.

Cependant, comme il est impossible d'atteindre exactement ces limites, la loi accorde une tolérance de trois millièmes au-dessus et au-dessous pour les monnaies d'argent; de sept millièmes pour la monnaie de billon, et de cinq millièmes pour l'argenterie. Les médailles sont au titre de $^{950}/_{1000}$ avec une tolérance de trois millièmes.

Coupellation. — C'est le procédé le plus ancien pour le dosage de l'argent dans les alliages qu'il forme avec le cuivre. On emploie pour ces sortes d'analyse par voie sèche, de petits vases formés avec des os calcinés. Cette matière, qui n'est autre que du phosphate de chaux, est réduite en poudre, et délayée dans l'eau; avec cette pâte on façonne ces petits vases qui portent le nom de *coupelles*.

Dans l'intérieur d'un four à réverbère, on place une moufle qui reçoit les coupelles. Le dôme de la moufle est percé de plusieurs trous pour donner passage à l'oxigène. Dans la coupelle on introduit une certaine quantité de plomb pur, quantité que nous déterminerons plus loin. Quand le métal est fondu, on porte dans la coupelle un poids d'un gramme de l'alliage,

renfermé dans un petit morceau de papier, pour éviter de perdre de petites parcelles d'alliage qu'on ajoute pour compléter le poids, et en second lieu pour réduire la couche d'oxide de plomb qui s'est formée à la surface du bain sur lequel surnage l'argent. L'argent est alors en fusion, et le cuivre s'oxide et se fond avec la litharge, laquelle se volatilise et entre en partie dans les parois de la coupelle. Quelque temps après, lorsque la température s'est abaissée, l'argent, dont l'aspect était, par suite, devenu terne, reprend tout-à-coup une apparence très-brillante (phénomène de l'éclair), ce qui indique la fin de l'opération. Quand on retire la coupelle du fourneau, il faut avoir soin d'opérer graduellement afin d'éviter de faire *rocher* le bouton d'argent qui affecte une forme convexe. Le culot d'argent détaché après complet refroidissement, porte le nom de *bouton de retour*. On le pèse, et son poids en milligrammes exprime le titre que l'on voulait trouver.

Cette méthode indique toujours un titre plus faible que le titre réel. Cela tient à ce qu'une partie du métal se volatilise, et qu'une autre est entraînée par l'oxide de plomb dans la coupelle. Cependant, quand les essais sont faits par un essayeur exercé, la coupellation donne toujours le titre exact, à moins de quatre millièmes près.

Comme la quantité d'argent entraînée dans les parois de la coupelle et la perte par la volatilisation augmentent avec la proportion de plomb, on a déterminé la quantité nécessaire pour affiner les alliages à différents titres.

M. d'Arcet a donné les proportions suivantes, le poids de l'alliage étant pris pour unité :

Titre de l'alliage.	*Quantité de plomb.*
1000 millièmes	$^3/_{10}$
950 *id.*	3
900 *id.*	7
800 *id.*	10
700 *id.*	12
600 *id.*	14
500 *id.*	de 16 à 17
400 *id.*	*id.*
300 *id.*	*id.*
200 *id.*	*id.*
100 *id.*	*id.*
Cuivre pur	*id.*

Quand on reçoit un alliage, on juge à peu près de son titre par sa couleur, sa dureté, son élasticité, ou mieux encore, par une première coupellation, puis on en fait une seconde avec la quantité de plomb indiquée par la table.

Nous devons ajouter qu'à l'inspection des coupelles on peut juger du métal uni à l'argent, car cette méthode n'est pas uniquement applicable aux essais des alliages d'argent et de cuivre ; ainsi, lorsque le fond de la coupelle est brun, cette couleur est due à la présence du cuivre ; s'il est jaune à chaud et blanc à froid, l'alliage contient du zinc, et quand le bouton contient de l'antimoine, la coupelle se brise toujours.

Méthode par voie humide.

En 1829, lorsque M. Gay-Lussac était essayeur en chef à l'Hôtel de la Monnaie de Paris, il indiqua une méthode que l'on suit actuellement dans tous les hôtels des monnaies. Ce procédé est fondé sur la précipitation d'un sel d'argent à l'état de chlorure par l'acide chlorhydrique. On fait usage d'une dissolution titrée de chlorure alcalin, c'est-à-dire d'une liqueur dont un poids ou un volume déterminé précipite un poids connu d'argent. On voit donc que d'après la quantité de liqueur qu'il aura fallu employer pour précipiter tout l'argent, on connaîtra nécessairement le poids de ce métal qui se trouvait dans la dissolution.

Gisement de l'argent.

L'argent se trouve dans un grand nombre de minerais. Les espèces sont les suivantes :

Minéraux métalliques.	L'argent natif.	
Minéraux sulfurés, séléniés et tellurés.	Le sulfure simple.	
	Sulfures doubles...	Cuivreux. Antimoniaux. Arsenicaux.
	Sulfures multiples.	Cuivre et antimoine. Plomb et antimoine. Plomb et bismuth. Cuivre, antimoine, arsenic.
	Le séléniure simple. Le séléniure cuivreux. Le tellurure simple. Les tellurures aurifères.	
Minéraux arseniés....	L'arseniure.	
Minéraux carbonés...	Le carbonate.	
Minéraux chlorés et iodés..............	Le chlorure, l'iodure.	

Alliages.	Les antimoniures. L'amalgame. Les aurures.

Ces minerais appartiennent en général aux terrains primitifs et de transition. On les trouve en filons dans le gneiss, les schistes micacés, les schistes argileux, les calcaires intermédiaires et les porphyres. On les rencontre aussi dans les terrains secondaires. Au Pérou, on les exploite dans le Zeichstein, à l'état de minerais terreux qui portent le nom de *pacos;* ils existent en masses considérables entre les bancs calcaires.

Deuxième division.

PALLADIUM.

Le palladium a été découvert en 1803 par M. Wollaston. Sa couleur est le blanc grisâtre. Il a pour pesanteur spécifique 11,5.

Le palladium forme deux oxides, qui ont pour formule Pdo et Pdo^2.

Ce métal s'obtient en versant du cyanure de mercure dans la dissolution du minerai de platine dans l'eau régale, avant ou après la séparation du platine. Mais il faut avoir soin de neutraliser l'acide par le carbonate de soude. Le cyanure de palladium est calciné; pour le fondre, on l'expose dans un creuset à un violent feu de forge.

Le sulfate de protoxide de fer réduit l'azotate de palladium.

VANADIUM.

Le vanadium a été découvert en 1830 par M. Sefstrom, dans le fer et les scories d'affinage qui proviennent des minerais de Jaberg, en Suède.

Les oxides de vanadium sont irréductibles par cémentation.

Les sels de vanadium donnent un précipité noir avec la noix de galle. L'hydrogène sulfuré ne précipite rien.

L'ammoniac donne un précipité brun qui ne se redissout pas dans un excès de réactifs.

URANE.

L'urane a été découvert en 1787. Sa pesanteur spécifique est de 8 à 9.

Les sels d'urane donnent un précipité pourpre avec le cyanure jaune. La noix de galle donne un précipité brun quand les liqueurs sont neutres. La potasse précipite en jaune l'hydrate d'urane.

CUIVRE.

Ce métal a été connu de toute antiquité. Sa couleur est le rouge pur éclatant. Le titane présente aussi le même aspect, mais il est facile de les distinguer, car le titane n'est pas attaqué par l'acide nitrique. C'est le métal le plus tenace après le fer.

La densité du cuivre fondu est exprimée par 8,83, et celle du cuivre étiré en fil, par 8,96.

Le cuivre entre en fusion à la température de 27° du pyromètre, chiffre qui correspond à 788° centigrades. Quand on le chauffe plus fortement, il répand des vapeurs qui communiquent à la flamme une teinte verte. Cependant le cuivre est très-peu volatil, on peut même le regarder comme à peu près fixe.

Le cuivre forme trois degrés d'oxidation. Ces oxides sont : le protoxide de cuivre, $cu^2.O$; le deutoxide, $Cu.O$, et le peroxide, cuo^2.

Les oxides de cuivre sont réductibles par l'hydrogène, le carbone, le soufre, les substances organiques, et par plusieurs métaux, tels que le fer et le zinc.

Sels de protoxide.

Ces sels sont très instables. Au contact de l'air, ils se transforment en bi-oxide, ainsi que le montre la formule suivante :

$$Ac, Cu^2O + O = Ac, (Cu.O)^2.$$

Les alcalis fixes donnent un précipité jaune de protoxide de cuivre.

L'ammoniac dissout tous les sels, et la dissolution est incolore ; mais si on l'expose au contact de l'air, le sel se suroxide, et la liqueur se colore en bleu intense.

Sels de peroxide.

Avec la potasse.	*précipité*	*bleu.*
Ammoniac.	*id.*	*bleu-verdâtre.*

Un excès d'ammoniac les fait passer au bleu intense.

Oxalates-phosphates. . . .	*précipité*	*blanc-verdâtre.*
Acide sulfhydrique. . . .	*id.*	*noir.*
Cyanure jaune.	*id.*	*pourpre.*
Chrômates.	*id.*	*jaune-pâle.*

L'ammoniac fait passer au vert.

Iodure.	*précipité*	*jaunâtre.*
Noix de galle. . . .	*id.*	*gris.*
Arsenites solubles . .	*id.*	*vert* (vert de Schéele

L'acide tartrique neutralise l'action de certains réactifs sur les sels de peroxide, quand on emploie la potasse, par exemple. Le sucre agit de même. Le blanc d'œuf donne un précipité.

Alliages de cuivre.

BRONZE.

Le cuivre allié avec l'étain forme le *bronze*. La proportion de l'alliage est de 10 à 12 d'étain pour 88 ou 90 de cuivre; mais cette proportion varie avec le calibre des bouches à feu qui sont composées de cet alliage. Pour les statues, la proportion d'alliage est de 20 d'étain pour 80 de cuivre; pour le métal des cloches, 22 d'étain et 78 de cuivre. L'alliage des miroirs de télescopes contient jusqu'à 33 1/2 d'étain.

LAITON.

Le cuivre et le zinc peuvent s'unir en toutes proportions, ils forment alors un alliage connu dans le commerce sous le nom de *laiton*. Les proportions d'alliage sont généralement 30 de zinc sur 70 de cuivre. Le *chrysocale* ou *similor* contient 90 parties de cuivre sur 8 de zinc et 2 de plomb.

Dans la Chine, on fait un grand usage des alliages de cuivre, de nickel et de zinc. Ils portent le nom de *pak-fung*, *toutenague* et *cuivre blanc*.

On prépare en Allemagne un alliage appelé *cuivre blanc*, dont voici la composition :

Cuivre. . . .	0,534	ou	0,500
Nickel. . . .	0,175	ou	0,187
Zinc. . . .	0,291	ou	0,313
	1,000		1,000

Le *maillechort* fabriqué à Paris contient :

Cuivre.	0,650
Nickel.	0,168
Zinc.	0,130
Fer.	0,034
Etain et cobalt . .	0,002
	0,984

Cet alliage est sensiblement magnétique.

Analyse des alliages.

On traite l'alliage par l'acide nitrique pour le convertir en nitrate. La liqueur contiendra du zinc, de l'étain, du fer et

du plomb. L'acide stannique, étant insoluble, donnera la quantité de l'étain.

Le plomb se dose à l'état de sulfate par addition d'un sulfate alcalin.

La liqueur qui contient le fer, le zinc et le cuivre, est traitée par l'hydrogène sulfuré, et le précipité noir, qui est le sulfure de cuivre, est calciné avec l'acide azotique qui ramène le sulfure à l'état de bi-oxide. Le sel de fer qui était, dans la dissolution, au maximum est ramené au minimum. On fait bouillir la liqueur pour chasser l'hydrogène sulfuré; on reprend par l'acide azotique pour ramener le fer au maximum, et on le dose à l'état de peroxide en le précipitant par l'ammoniac, qu'il faut avoir soin de mettre en excès pour ne pas entraîner le zinc. Ce dernier métal se dose à l'état de carbonate, mais on doit évaporer et calciner doucement jusqu'à ce qu'on ne sente plus d'ammoniac; le résidu est repris par l'eau, et on verse le carbonate alcalin.

Analyse de quelques airains de cloche.

	Angleterre.	Cloche en cuivre de Gisors.	Cloche coulée au 15e siècle. — Rouen.
Cuivre. . . .	0,800. . .	0,724. . .	0,710
Etain. . . .	0,101. . .	0,242. . .	0,260
Zinc	0,056. . .	0,010. . .	0,018
Plomb. . .	0,043. . .	0,004. . .	»
Fer. . . .	» . .	trace. . .	0,012

Analyse de deux laitons.

Cuivre. . . .	0,658. . . .	0,641
Zinc.	0,317. . . .	0,336
Plomb. . . .	0,022. . . .	0,020
Etain. . . .	0,003. . . .	0,003

Gisement du cuivre. — Le cuivre existe dans les terrains anciens et dans les terrains secondaires; il est surtout abondant dans le grès rouge.

Les minéraux qui contiennent le cuivre sont :

Le *cuivre natif*; — l'*oxidule*; — l'*oxide*; — l'*oxi-chlorure*; — le *sulfure*; — *cuivre pyriteux*; — *cuivre panaché*; — *sulfure antimonial*; — *sulfure stannifère*; — *sulfure bismuthique*; — *sulfure argentifère*; — les *sulfures arsenifère, antimonifère, plombifère*; — les *sulfates*; — le *séléniure*; — les *phosphates*; — les *arseniates*; — l'*arsenite*; — les *silicates hydreux*; — le *carbo-*

iate anhydre ; — le *carbonate vert* ; — le *carbonate bleu* ; — le *chrômate plombifère* ou *vauquelinite*.

Quand on veut essayer un minerai de cuivre rapidement, on le mêle avec du carbonate de soude et du charbon ; le carbonate s'empare de tous les corps étrangers que renferme e minerai, et le charbon réduit le cuivre. Pour avoir ce cuivre, on pulvérise la matière avec de l'eau qui entraîne le charbon ; on décante, et le cuivre se présente sous forme de petites lames allongées. Les scories des fourneaux peuvent être examinées de cette manière.

Dans le cas d'empoisonnement, on y recherche le carbonate, le sulfate et le sous-acétate de cuivre. Le carbonate de cuivre qui se trouve sur les ustensiles de ménage contient de l'oléate et du stéarate de cuivre provenant des graisses qui ont servi à diverses préparations.

Les sels de cuivre sont faciles à détruire par la limaille de fer délayée dans de l'eau sucrée ; le cuivre alors est ramené à l'état métallique.

Le cuivre se rencontre dans les viandes et les gelées que préparent les charcutiers. Ce cuivre provient de l'acide hydrochlorique qui a servi à laver la gélatine et qui a attaqué les vases dans lesquels elle se trouvait. Dans ce cas, la présence du cuivre est facilement reconnaissable : on incinère la matière et on dissout dans l'acide azotique étendu ; les phosphates terreux seront précipités à l'aide de l'ammoniac, et la liqueur filtrée ne contiendra plus que des sels calcaires et le sel de cuivre. On ajoute alors un cyanoferrure qui précipite le cuivre et quelques matières étrangères ; on recueille ce précipité et on le calcine. Il se forme alors du bi-oxide qu'on dissout dans l'acide sulfurique, et avec une lame de fer on précipite le cuivre à l'état métallique.

Dosage du cuivre. — On peut le doser à l'état de bi-oxide après l'avoir précipité par la potasse à chaux.

On dose aussi le cuivre par l'hydrogène sulfuré ; mais pendant le lavage, le sulfure de cuivre passe à l'état de sulfate ; on doit donc laver avec de l'eau chargée d'acide sulfhydrique. On grille le sulfure qui se réduit à l'état de bi-oxide. On peut séparer le cuivre de tous les métaux par cette méthode, en maintenant la liqueur fortement acide. Le cadmium cependant ne se sépare pas ; on doit alors ajouter un excès de carbonate d'ammoniac qui dissout le cuivre et isole le cadmium.

Troisième division.

ETAIN.

L'étain a une blancheur presque aussi éclatante que celle de l'argent. Il a une saveur et une odeur très-désagréables. Sa pesanteur spécifique est représentée par le chiffre 7,29. C'est le plus fusible de tous les métaux; sa, température, au point de fusion, a été estimée de 212° à 228° centigrades. Il répand, lorsqu'il brûle, des fumées blanches. Cependant, il a été expos à une très-haute température sans rien perdre de son poids.

On connaît quatre oxides d'étain, savoir :

1° Le protoxide SnO; 2° l'acide stannique SnO^2; 3° une combinaison intermédiaire entre le protoxide et l'acide stannique Sn^2O^3; 4° un stannate à base d'oxide stanneux Sn^4O ou SnO, Sn^3O^6.

Sels d'étain.

Sels de protoxide. — Ils ont une couleur blanche.

Avec les alcalis fixes, ils donnent un *précipité blanc.*

Avec l'ammoniac, — *précipité* insoluble dans un excès de réactif, mais qui devient *jaune-olivâtre* quand on le chauffe fortement.

Avec les carbonates alcalins.	*précipité*	*blanc.*
Avec les cyanures de potassium et de fer.	*id.*	*id.*
Hydrogène sulfuré et sulfures alcalins.	*id.*	*brun.*
Avec les iodures.	*id.*	*rouge.*

Les dissolutions de ces sels réduisent les sels d'or et de mercure quand ils sont à l'état d'oxides.

Sels au maximum. — Avec le cyanure jaune de potassium et de fer, — *précipité blanc.*

Le cyanure rouge n'a pas d'action sur eux, de même que les iodures.

Le fer et le zinc précipitent l'étain de ses dissolutions. Au moyen du chlorure d'or et du bichlorure de mercure, on peut déterminer si le sel est au maximum ou au minimum. De tous les sels d'étain, le protochlorure seul, $Cl. Sn$, offre de l'intérêt, ainsi que le bichlorure, Cl^2Sn. Le protochlorure est employé dans la teinture, par la propriété qu'il a d'enlever la moitié du chlore au bichlorure de cuivre, et de passer lui-même à l'état de bichlorure.

Alliages.

Fer-blanc. — Le fer-blanc est un alliage de fer et d'étain qu'on obtient en plongeant dans un bain d'étain les feuilles de tôle bien décapées. Les fers-blancs moirés s'obtiennent en attaquant la surface des feuilles au moyen d'un acide faible.

L'étain se trouve dans la nature sous deux états : 1° l'*oxide d'étain*; 2° le *sulfure d'étain*.

L'oxide d'étain se rencontre en filons, en amas, et le plus souvent en veinules disséminées dans les terrains anciens. Le porphyre et les grès rouges le renferment quelquefois en veines. Sa gangue est le wolfram, le molybdène sulfuré et les pyrites arsenicales.

Les principaux gîtes d'étain sont aux Indes, au Chili, au Mexique, dans la Cornouaille, en Espagne, en Saxe et en Bohême. On connaît en France quelques gîtes, mais ils sont sans grande importance.

Etains du commerce. — Ils peuvent contenir du cuivre, du plomb, du fer et de l'arsenic. Pour doser le plomb et le cuivre, on dissout, dans l'acide nitrique pur, à chaud, jusqu'à complète oxidation de l'étain; on évapore jusqu'à siccité et on reprend par l'eau en calcinant le résidu. Si la teinte est blanche, c'est de l'oxide d'étain pur; mais s'il contient des traces de fer, l'oxide est coloré en jaune. En reprenant le résidu par l'acide nitrique, on précipite le plomb par l'acide sulfurique, et le cuivre, par une lame de fer ou un carbonate alcalin. Restent le fer et l'arsenic qu'on reprend par l'acide chlorhydrique, et qu'on dose par les méthodes que nous avons indiquées.

Au *cri* que fait entendre l'étain, en ployant un lingot, on peut juger de sa pureté; et c'est ce moyen qu'on emploie aussi dans le commerce : plus le cri est sensible et plus l'étain est pur. On juge aussi de la pureté d'un étain, en le faisant fondre ; le plus pur est le plus blanc et celui qui présente le moins d'indices de cristallisation à sa surface.

Etain et zinc. — La séparation de cet alliage est facile à opérer. On traite par l'acide azotique qui dissout le zinc, et on dose l'étain en évaporant la solution à siccité. Le zinc est dosé à l'état d'oxide en convertissant le nitrate formé par la chaleur rouge.

Etain et plomb. — On dissout l'alliage dans l'acide azotique, qui s'empare du plomb qu'on précipite par l'acide sulfurique, après avoir évaporé jusqu'à sec et repris par l'eau.

ANTIMOINE.

L'antimoine a une couleur très-éclatante. Il est d'un blanc gris ; sa pesanteur spécifique est de 6,70 à 6,86. Il entre en fusion à la température de 430°. L'antimoine est volatil. Il forme, avec l'oxigène, trois combinaisons : 1° le protoxide, Sbo^3 ; 2° l'acide antimonieux, Sbo^4, et l'acide antimonique Sbo^5.

Caractères des sels d'antimoine.

Les alcalis fixes et l'ammoniac,	*précipité*	*blanc.*
Le cyanoferrure de potassium, dans des liqueurs acides. . .	*id.*	*id.*
Acide sulfhydrique.	*id.*	*rouge orangé.*
Sulfhydrates.	*id.*	*id.*

Le fer, le zinc, le cadmium et l'étain précipitent l'antimoine de ses dissolutions.

L'antimoine se rencontre dans la nature sous plusieurs états :

Antimoine métallique ou *arsenifère* ; — l'*oxide* ; — l'*acide antimonieux* ; — l'*acide antimonique* ; — le *sulfure* ; — l'*oxisulfure* ;— l'*haidingérite* ;— les *galènes antimoniales dans les cuivres gris* ; — le *nickel antimonial* ;— l'*argent antimonial* ; — l'*argent rouge* ; — l'*argent gris*. — Ces minéraux se trouvent disséminés dans les terrains anciens.

Dosage de l'antimoine.

Pour analyser l'antimoine, on dissout dans l'eau régale, et on fait passer un courant d'hydrogène sulfuré. Ce précipité lavé, est placé dans un tube de verre muni d'une boule, et au moyen d'un courant d'hydrogène on isole l'antimoine.

MOLYBDÈNE.

Ce métal a été découvert en 1718 dans un minéral que l'on prenait pour la plombagine. Sa pesanteur spécifique est 8,61. Il forme avec l'oxigène trois combinaisons : le protoxide, le peroxide, et l'acide molybdique.

Ce métal offre peu d'intérêt dans l'industrie. On le rencontre sous trois espèces : l'*acide molybdique*, le *molybdate de plomb* ou *plomb jaune*, et le *sulfure de molybdène*.

On obtient ce métal à l'état de pureté en réduisant l'acide molybdique par le gaz hydrogène, ou bien encore en réduisant ce même acide dans un creuset brasqué et l'exposant à la chaleur rouge.

Quatrième groupe. — Métaux attaquables par l'eau régale seule.

OR.

L'or est un métal d'un beau jaune un peu rougeâtre. Sa pesanteur spécifique est de 19,40 à 19,65. Il entre en fusion à une température de 32° du pyromètre. Quand on le chauffe à la flamme du chalumeau, il se volatilise sensiblement.

L'or forme deux oxides avec l'oxigène, qui ont pour formule Au^2O et Au^2O^3. L'équivalent de l'or est 1243,02.

Le protoxide d'or Au^2O est une poudre verte. Cet oxide est très-peu stable, il se réduit par l'action de la lumière directe, et se décompose par la chaleur.

Le peroxide d'or, ou l'acide aurique, est noir à l'état anhydre; mais lorsqu'il est hydraté, il prend une couleur brune-jaunâtre.

L'or est très-répandu dans la nature; le Rhône, le Rhin, le Danube, charrient de l'or métallique. Pour le séparer, on lave : les parties légères sont emportées, l'or, par sa grande densité, gagne le fond des vases dans lesquels on opère. On amalgame ensuite, et on distille. Lorsque l'or est disséminé dans des matières dures, on fond le minerai avec un oxide de plomb : on obtient de cette manière un lingot que l'on fait passer à la coupelle.

Le minium contient de l'or : pour éviter qu'il ne se mêle à la matière à essayer, on traite la même quantité d'oxide de plomb, et on connaît par ce moyen la proportion d'or contenue dans le minium.

L'eau régale seule dissout l'or et donne lieu à la formation d'un chlorure d'or.

Quand on verse du chlorure d'or dans une dissolution d'or très-acide, il ne se produit rien; mais il y a formation d'un chlorure double si la dissolution est neutre.

La baryte et la magnésie donnent un précipité.

L'ammoniac donne un précipité abondant d'ammoniure d'or; c'est de l'or fulminant.

Le fer réduit l'or à l'état métallique, quelle que soit la nature du mélange. La nuance du précipité diffère selon l'état de concentration des liqueurs.

Le protochlorure d'étain forme un précipité brun. Il se produit du bichlorure d'étain qui, en présence de l'eau, la dé-

compose et se dépose sous forme d'acide stannique; et l'unit avec l'or.

Le nitrate de protoxide de mercure précipite l'or, ainsi que le protochlorure de mercure.

Dosage de l'or.

L'or se dose à l'état métallique; on le précipite au moyen du sulfate de fer ou du nitrate de mercure. On peut aussi employer l'or fulminant pour doser l'or, mais il faut le broyer avec du soufre et chauffer le mélange au rouge; on a pour résidu de l'or parfaitement pur. L'analyse se fait aussi par la coupellation, mais pour les alliages de cuivre et d'or.

Si l'alliage est soluble dans l'acide azotique, on le dissout, et on filtre. Dans les ateliers d'essai, on opère de manière à n'attaquer que le cuivre, en substituant au cuivre une certaine quantité d'argent, c'est ce qu'on appelle *inquarter*. On obtient un bouton qu'on lamine et qu'on fait bouillir avec de l'acide azotique, il se produit de l'azotate d'argent et de l'or métallique.

Alliages d'or.

L'or et le fer peuvent s'unir en toutes proportions. Ces métaux peuvent se souder entre eux.

Le cuivre et l'or s'allient aussi en toutes proportions. Le cuivre donne de la dureté à l'or en même temps qu'il rehausse sa couleur. Les monnaies d'or françaises renferment 0,100 de cuivre, et, par tolérance, 0,098 à 0,102. La vaisselle en renferme de 0,88 à 0,25.

L'argent et l'or forment des alliages qui sont plus fusibles que l'or pur, et servent pour la soudure. Les alliages d'or et d'argent ont une couleur verdâtre, et un vingtième d'argent peut enlever entièrement la couleur de l'or. L'or vert des bijoutiers contient 0,708 d'or et 0,292 d'argent.

Procédés de dorure et d'argenture, par MM. DE RUOLZ et ELKINGTON.

On sait qu'autrefois on se servait, pour dorer et argenter, des amalgames d'or et d'argent. Sur la pièce décapée, on appliquait l'amalgame, et en chauffant à une certaine température, le mercure se volatilisait et l'or restait fixé sur l'objet. On dorait aussi par le *plaqué;* ce procédé consistait à réunir sur une plaque de cuivre une feuille d'argent de plus mince épaisseur. Ces métaux étaient chauffés pour les fixer l'un à l'autre, puis ensuite martelés et laminés suivant la forme qu'on

voulait leur donner ; mais aujourd'hui, ces procédés sont complètement abandonnés, et on leur substitue le procédé par voie humide, qui est dû à MM. de Ruolz et Eklington.

Procédé de M. Elkington. — *Dorure au trempé.*

Si on fait bouillir une dissolution régale d'or ou de bichlorure, avec du bicarbonate de potasse pendant deux heures environ, le sel se décompose en protochlorure et en chlore ; ce dernier se porte sur le carbonate, de manière à former du chlorure de potassium. Les deux chlorures, en s'unissant, donnent un sel double qui reste en dissolution avec du carbonate neutre, du sesquicarbonate et du bicarbonate de potasse. Si on vient à plonger dans la liqueur une feuille métallique, l'or s'y précipite, de manière à former la dorure. Telle est la théorie de l'opération. Mais, dans la pratique, cette dorure doit s'exécuter avec le plus grand soin.

L'objet à dorer doit être d'abord parfaitement décapé : pour cela, on l'expose à une chaleur un peu plus élevée que le rouge sombre, de manière à oxider le métal. Cette première opération porte le nom de *recuit*. Avant que le métal ne soit refroidi, on le trempe dans un bain d'acide sulfurique à 20° de l'aréomètre de Beaumé, qui dissout l'oxide dont le métal est recouvert, après quoi on lave à grande eau. Cette seconde opération se nomme *dérochage*. L'oxide n'est pas encore complètement enlevé ; on doit alors porter l'objet dans une liqueur plus énergique et composée de :

	kilog.
Acide sulfurique.	4,133
Acide nitrique.	1,130
Chlorure de sodium. . . .	0,42
Eau distillée.	1,330

Au bout de quelques instants dans ce bain, l'oxide a complètement disparu. On lave à grande eau, et on dessèche dans la sciure de bois qu'on maintient à une température de 80 ou 100° ; après quoi on plonge l'objet à dorer dans la liqueur. La dissolution régale d'or s'obtient en attaquant 77.g250 d'or pur par 646.g860 d'acide renfermant des poids égaux d'acide azotique et chlorhydrique du commerce.

On ajoute à cette liqueur 4.k50 de bicarbonate de potasse dans 9 litres d'eau. Il est convenable, avant de plonger l'objet dans cette liqueur à dorer, de le tremper quelques instants dans une dissolution d'azotate de mercure à 1° de l'aréomètre. Les objets à dorer doivent rester pendant une ou deux

minutes dans la dissolution régale d'or, après quoi on les sèche dans la sciure de bois.

Pour rendre à l'or son brillant, on frotte la pièce avec une brosse en fils de laiton très-flexibles, et on achève de la polir au *brunissoir*, après l'avoir laissée quelques instants dans une liqueur composée d'or et de cuivre. C'est ce qu'on appelle la *mise en couleur*.

Si on veut avoir une dorure mate, on plonge la pièce dans un bain composé de :

Nitre.	500 grammes.
Alun.	500
Sulfate de zinc. . .	250
Sulfate de fer. . .	250
Eau.	4 litres.

D'après des analyses qui ont été faites à ce sujet, on a trouvé que chaque décimètre quarré contenait 0.g043 d'or sur les pièces les plus fortement dorées, et 0.g027 sur celles qui l'étaient le moins. Par l'ancien procédé au mercure, ces chiffres correspondaient aux suivants : 0.g142 et 0.g042.

Procédé de M. de Ruolz.

Si dans une dissolution d'or on fait plonger les deux réophores d'une pile, et qu'au pôle négatif on fixe l'objet à dorer, le métal vient s'y déposer ; mais en même temps l'acide mis en liberté vient attaquer la surface où s'est produit le dépôt d'or. La dorure alors n'est ni belle ni solide. M. de Ruolz a préparé des liqueurs dans lesquelles l'acide n'était jamais mis en liberté : c'est en quoi consiste son procédé.

La dissolution qu'il emploie le plus fréquemment est ainsi préparée : on dissout 6 parties de cyanoferrure de potassium et une partie d'acide aurique, de cyanure d'or ou de chlorure d'or qu'on fait bouillir dans 100 parties d'eau distillée. La liqueur est filtrée pour séparer le bleu de Prusse qui s'est déposé.

La liqueur d'or doit être maintenue à une douce température dans un vase qui reçoit le fil positif d'une pile. L'objet à dorer est suspendu à une petite tringle qui communique avec le pôle négatif.

Les pièces à dorer doivent être décapées, mais il n'est pas nécessaire d'apporter à cette opération tout le soin obligé dans le procédé de M. Elkington. On peut obtenir la dorure aussi épaisse que l'on veut en laissant l'objet plus ou moins longtemps dans la liqueur : c'est là encore un avantage sur l'autre procédé.

D'après des analyses qui ont été faites avec beaucoup de soin, on a remarqué que la quantité d'or varie avec la température à laquelle on opère, et est proportionnelle au temps si la température est constante.

M. de Ruolz place une feuille d'or dans la dissolution. Cette feuille, en dissolvant petit à petit, restitue à la liqueur une quantité de métal proportionnelle à celle qui s'est déposée sur la pièce.

Quand l'objet est sorti du bain, on passe à la mise en couleur. Pour cela, on le trempe dans une pâte composée de :

Sulfate de fer.	24	parties.
Sanguine.	24	*id.*
Sel ammoniaque.	3	*id.*
Acétate de cuivre.	3	*id.*
Sel marin.	15	*id.*
Salpêtre.	3	*id.*
Silicate de potasse.	3	*id.*

Après cette opération, on le porte dans une étuve dont la température peut varier de 100 à 120°. Ensuite on le lave, on fait sécher et on passe au *brunissoir*.

L'argenture se fait de la même manière que la dorure, mais la réaction s'opère moins rapidement. La liqueur est formée de :

Cyanure d'argent. . . .	1	partie.
Cyanure de potassium. . .	10	*id.*
Eau.	106	*id.*

Le procédé de M. de Ruolz s'étend à plusieurs métaux tels que le platine, le nickel, le cobalt, l'étain, le plomb.

GALVANOPLASTIE.

La galvanoplastie a pour objet de former des empreintes de différents objets, en les recouvrant petit à petit d'une couche métallique provenant de la décomposition d'un sel. Mais les parties métalliques qui se séparent sous l'influence de la pile et qui vont se déposer sur les objets soumis à l'expérience, ne doivent pas adhérer à leurs surfaces.

On fait usage de piles à courant constant composées d'un seul élément de zinc et de charbon.

La galvanoplastie sert à reproduire des planches pour la gravure en taille douce. Elle sert encore à la préparation du plaqué. A cet effet, on prend une surface quelconque qu'on recouvre de plombagine et sur laquelle on fait déposer de l'argent.

On porte ensuite cette surface dans une dissolution de cuivre, le cuivre se dépose et se fixe invariablement.

PLATINE.

Le platine tire son nom du mot *platina*, qui signifie petit argent. Connu en Amérique depuis longtemps, il n'a été introduit en Europe que vers l'année 1740.

Le platine forgé est d'un blanc un peu gris; sa pesanteur spécifique varie de 21,47 à 21,53.

Le platine est infusible à la plus haute température de nos fourneaux, mais il peut se liquéfier à l'aide du chalumeau à gaz hydrogène. A la chaleur blanche, il se ramollit, c'est dans cet état qu'on peut le forger et le souder à lui-même comme le fer.

On obtient le platine en *éponge* par la calcination d'un sel ou d'un chlorure. Dans cet état, il est mat et mou, et ne prend l'éclat métallique que par le frottement.

Le platine donne naissance à deux oxides, PtO et PtO^2. L'équivalent du platine est représenté par 1233,42.

La potasse donne, avec les sels de bi-oxide de platine, un *précipité* mal défini et composé de tous sels.

Dans les sels de protoxide, au contraire, on a un *précipité noir*, soluble dans un excès de réactif.

Avec le cyanoferrure de potassium.	*rien.*
L'hydrogène sulfuré. . . .	*brun foncé dans les sels au maximum.*
Ammoniac	*formation d'un chlorure double.*
Chlorhydrate d'ammoniac. .	*idem.*
Chlorure de potassium. . .	*idem.*

Dosage du platine.

On précipite le platine par le chlorhydrate d'ammoniac; mais ce chlorure double étant un peu soluble dans l'eau, on le forme dans de l'eau étendue d'alcool et d'éther.

Gisement et préparation des minerais de platine.

Le platine se rencontre à l'état métallique dans les sables aurifères du Brésil. Il se rencontre aussi en grande quantité dans les Monts-Ourals.

Le platine à l'état de minerai est allié :

1° A du sable et à différents minerais tels que le fer chrômé et titané, des zircons, des hyacinthes;

2° A du mercure;
3° A des paillettes d'or, à de l'argent, du fer et du cuivre;
4° A du rhodium, du palladium et de l'osmiure d'iridium.
Le mercure disparaît par la calcination. L'eau régale dissout l'or, l'argent, le fer et le cuivre.

Le résidu est traité par de l'eau régale plus concentrée; alors le platine et le palladium, l'iridium, le rhodium et l'osmium se dissolvent. L'osmiure d'iridium reste pour résidu.

Avec le chlorhydrate d'ammoniac, on précipite le platine et l'iridium à l'état de chlorures combinés à l'ammoniac. On lave le précipité dans de l'eau alcoolisée, puis on calcine. Le résidu contient le platine et l'iridium à l'état métallique. Pour avoir le platine, on dissout de nouveau dans l'eau régale assez faible pour ne pas attaquer l'iridium. On précipite de nouveau le platine par le sel ammoniaque et on calcine. Le platine s'obtient alors en masse très-poreuse et friable, connue sous le nom d'éponge de platine. Pour convertir la mousse en lingot, on l'introduit dans un cylindre creux en cuivre et fermé à sa partie inférieure. On la comprime au moyen d'un cylindre plein en fer qu'on introduit dans celui en cuivre. On chauffe graduellement jusqu'au rouge sombre.

TITANE.

Le titane se présente sous deux aspects. Celui qui provient des scories de quelques hauts-fourneaux est en petits grains cubiques d'un rouge de cuivre, très-éclatants. Sa pesanteur spécifique est de 5,3.

Le titane obtenu par la décomposition du chlorure ammoniacal, par le sodium, est pulvérulent, noir, ou d'un beau bleu d'indigo.

On connaît deux oxides de titane : le peroxide ou acide titanique, et l'oxide noir.

Sels de titane.

Les dissolutions de peroxide de titane sont incolores ou légèrement jaunâtres.

Avec les alcalis et les carbonates alcalins.	*précipités blancs floconneux d'hydrate.*
Avec les hydrosulfates. . .	*précipités blancs.*
Avec le prussiate jaune. .	*précipité rouge-brun qui se décompose et devient blanc.*
Avec la décoction de noix de galle.	*précipité rouge qui a l'aspect du sang caillé.*

Les dissolutions d'oxide noir de titane sont d'une couleur rouge de vin foncé, lorsqu'elles sont acides ; mais saturées par l'ammoniac, elles sont d'un beau bleu.

Les alcalis et les carbonates alcalins forment des *précipités* gélatineux d'un bleu très-intense.

Avec le prussiate jaune. . .	*précipité couleur de cannelle, qui verdit à l'air, surtout quand le titane contient du fer.*

Les espèces minérales qui contiennent le titane sont :

L'anatrase ou *oisanite ;* — le *peroxide* ou *ruthile ;* — les *titanates de peroxide de fer et de manganèse ;* — le *titanate de peroxide de fer* ou *craïonite ;* — le *polymignite* ou *titanate de zircône ;* — *l'œschinite* ou *titanate de zircône ou cérium ;* — le *sphène silicotitanate de chaux.*

Cinquième groupe. — Métaux attaquables par l'azotate de potasse, à une température rouge.

CHROME.

Le chrôme est un métal d'un gris de platine mat. Sa pesanteur spécifique est de 5,90.

Ce métal forme avec l'oxigène deux combinaisons : le protoxide Cr^2O^3, et l'acide chrômique CrO^3. On pense qu'il en existe un troisième qui aurait pour composition $(CrO^3)\,Cr^2O^3$.

L'équivalent du chrôme est représenté par 381,82.

Sels de chrôme.

Les sels à base d'oxide de chrôme sont colorés en vert ou en violet.

Avec les alcalis fixes. . .	*précipité, vert sale, d'oxide hydraté, soluble dans un excès de réactif.*
Ammoniac.	*précipité vert, soluble dans un grand excès de réactif.*
Carbonates.	*précipité vert sale, insoluble.*
Cyanoferrure de potassium	*précipité soluble dans les acides.*
Noix de galle.	*précipité brun.*

Aucun métal ne précipite le chrôme de ses dissolutions. Pour reconnaître qu'une substance contient du chrôme, il faut la calciner avec de l'azotate de potasse, et traiter la masse par l'eau. S'il y a du chrôme, la liqueur sera colorée en jaune par la dissolution du chrômate de potasse.

Le chrôme se rencontre dans plusieurs minéraux, qui sont :

Le *protoxide*; — l'*hydrate* ou *wolkouskoïte*; — le *spinelle rouge* ou *rubis*; — *plusieurs espèces de fer chrômé*; — le *chrômite de plomb*; le *chrômate de plomb*; — le *chrômate de plomb et de cuivre*; — le *vanadate de plomb*; — l'*émeraude verte*; — la *diallage*; — les *serpentines*.

TANTALE OU COLUMBIUM.

Le tantale, ou columbium, se rencontre dans des minerais très-rares, en Suède, en Amérique et en Bavière.

La *fergusonite* ou *tantalate d'yttria, de zircone et de cérium*; — les *yttro-tantalates* ou *tantalates d'yttria, de chaux, de fer et d'urane*; — *le tantalite de fer et de manganèse*, ou *tantalite seulement*; — les *tantalates de fer et de manganèse* ou *columbites*.

Ce métal forme deux degrés d'oxidation : l'oxide et l'acide tantalique.

Les alcalis convertissent le tantale en acide tantalique par la voie sèche. Il en est de même des carbonates alcalins.

OSMIUM.

Ce métal a pour pesanteur spécifique 7,00. Il a une couleur d'un gris de platine tirant sur le bleu.

L'osmium forme quatre oxides distincts : le protoxide, le deutoxide, le tritoxide et le peroxide, ou acide osmique.

Il se rencontre à l'état d'osmure, d'iridium, dans les minerais de platine.

TUNGSTÈNE.

Ce métal est d'un gris plus ou moins foncé. Sa pesanteur spécifique est de 17,22. Il forme deux degrés d'oxidation : l'oxide de tungstène et l'acide tungstique.

On rencontre ce métal dans le *tungstate de chaux* ou *schéelite*, le *wolfram* ou *tungstate de fer et de manganèse*, le *tungstate de plomb*.

RHODIUM. — IRIDIUM.

Ces deux oxides sont insolubles. Ils se changent en sesquioxides avec l'acide chlorhydrique. Le chlorure d'iridium formé est brun, tandis que celui de rhodium est rouge.

Avec le chlorhydrate d'ammoniac, le rhodium ne donne aucun précipité; mais ce sel précipite l'iridium en rouge pourpre foncé.

Le rhodium, chauffé au rouge avec le bisulfate de potasse, donne naissance à un bisulfate double, qui colore l'eau en rouge. L'iridium ne subit aucune action.

CHIMIE VÉGÉTALE.

Il est impossible d'établir une ligne de démarcation entre la chimie végétale et la chimie animale ; les éléments y sont les mêmes, ainsi que les forces qui agissent sur eux. La vie seule pourrait établir une distinction entre une substance organique et une substance minérale ; mais ce phénomène n'est pas, à proprement parler, du ressort de la chimie, et, si on vient à en faire abstraction, on remarque que toutes les matières du règne minéral, sous l'influence de la chimie, sont soumises aux mêmes lois que dans le règne organique. Cependant, dans le discours, on distingue facilement ce qu'on entend par *chimie végétale* et *chimie minérale* ou *inorganique*.

Les quatre éléments qui, par leurs nombreux composés, sous l'influence de la vie animale et végétale, donnent lieu aux substances organiques, sont :

L'oxigène,
L'hydrogène,
L'azote,
Le carbone.

PRINCIPE IMMÉDIAT.

Une substance organique de laquelle on ne peut retirer aucune autre substance sans altérer sa nature ou ses propriétés, est appelée *principe immédiat*.

Les matières organiques étant très-facilement décomposables par la chaleur, et pouvant aussi changer de nature quand on les traite par des réactifs puissants, il est nécessaire d'en faire l'analyse dans des circonstances toutes différentes de celles où les matières inorganiques ont été soumises. On fait usage de dissolvants incapables d'altérer la substance, ce sont ordinairement l'eau, l'alcool, l'esprit de bois, l'éther sulfurique et quelques huiles essentielles. Ce procédé d'analyse est connu sous le nom de *Méthode de dissolvants*. Il est dû à M. Chevreuil.

Le règne organique se compose du règne animal et du règne végétal.

Jusqu'ici, le règne végétal était distingué du premier, en ce qu'il ne contenait pas d'azote. Mais aujourd'hui, les expériences de M. Payen ont prouvé que tous les végétaux contiennent une matière azotée, sans laquelle ils paraissent ne pouvoir vivre.

TISSUS VÉGÉTAUX.

Si on dissèque un tissu végétal jusqu'à dernière analyse, on arrive toujours à voir qu'il est composé de globules dont l'agglomération forme des feuilles membraneuses, ayant plusieurs formes et des fonctions différentes.

Le tissu cellulaire est formé d'utricules membraneuses régulières et qui ont la forme hexagonale (*fig.* 30). Ces tissus sont remplis de sucs différents.

Lorsque la végétation commence, il y a dans la graine toutes les parties constituantes de la plante.

Le grain se compose de l'embryon, dont la composition est identiquement la même dans toutes les plantes.

En A est une matière azotée, coagulable par la chaleur, et qui doit servir à la nutrition de la plante. La proportion de matière azotée de l'embryon est telle que, distillée, elle donne immédiatement un excès d'ammoniac.

En B se trouve une matière nutritive, convenable au développement de la plante.

Si on examine l'extrémité des racines d'un végétal, on trouve que les radicelles ont toute la même disposition : au centre de la radicelle, est un tissu cellulaire; c'est le ligneux le plus pur de la radicelle; on le nomme *tissu médullaire*. Autour de celui-ci se trouve le tissu vasculaire qui conduit les liquides nourriciers.

Il y a encore un troisième tissu cellulaire, plus faible que le deuxième, qui contient beaucoup moins de canaux; il est imbibé des sucs secrétés par le tissu vasculaire.

Si on coupe une radicelle à une distance de son extrémité, égale à son diamètre, en arrivant jusqu'à la spongiole, on reconnaît que cette extrémité a la même forme dans tous les végétaux: c'est toujours cette spongiole qui s'allonge dans la terre.

Il était important de savoir si la matière azotée était essentielle à la végétation, ou simplement un produit de la végétation.

L'on a reconnu que sans cette matière azotée il n'y avait pas de végétation possible.

Voici les expériences que l'on peut faire pour reconnaître la présence de la matière azotée. On plonge une radicelle dans une dissolution de 1 à 1/2 millième de tannin. Cette substance s'introduira dans les spongioles, passera dans le tissu vascu-

laire et se rendra jusqu'au nœud vital, c'est-à-dire jusqu'à la séparation de la tige et de la racine.

Quand la végétation a eu lieu sous l'influence de cette dissolution, on trouve que le tannin, en se combinant à la matière azotée, a produit une matière animale tannée et brune. Dans la graine de maïs, par exemple, si on veut voir où se trouve la matière azotée, on coupe le bout de la radicelle en couches très-minces ; on verse du protonitrate de mercure sur chacune de ces tranches, on voit alors tout le tissu vasculaire se colorer en rouge, la partie médullaire est celle qui se colore le moins.

Si on met un végétal dans une dissolution contenant 0,001 de potasse, la potasse, en traversant le tissu vasculaire, dissout la matière azotée. Cette matière étant détruite, la radicelle devient transparente, et si on fait passer du tannin ou du protonitrate, ces réactifs n'indiquent plus la présence de l'azote ; et si l'on calcine, il ne se dégage plus de matière azotée. Cette matière azotée faisait donc fonction d'un liquide nourricier.

ANALYSE DES MATIÈRES ORGANIQUES.

MM. Dumas et Liebig ont donné un procédé pour le dosage de l'oxigène, de l'hydrogène, du carbone et de l'azote. On prend un tube de verre A (*fig.* 16) réfractaire fermé à la lampe à l'une de ses extrémités, qu'on a soin de recourber sous un angle d'environ 45°. Ce tube doit être parfaitement desséché ; on introduit ensuite à cette extrémité une couche de quelques centimètres d'oxide de cuivre. La substance organique desséchée et en poudre est mélangée intimement avec du bi-oxide de cuivre et de la tournure de cuivre grillée, et on remplit le tube avec ce mélange.

La tournure de cuivre a ici pour objet de diviser la masse, afin d'offrir un passage plus facile aux gaz. En B est un tube renfermant de la pierre-ponce imprégnée d'acide sulfurique, et qui s'adapte avec un tube de Liebig C, rempli d'une dissolution de potasse, lequel communique avec un autre tube D rempli de potasse. Ce tube doit être pesé avant et après l'opération ; il a pour objet de s'emparer de l'acide carbonique qui n'aurait pas été absorbé en entier par la dissolution de potasse. Les tubes B et C sont aussi pesés avant l'opération. On chauffe alors à partir de l'extrémité recourbée, on avance les charbons successivement jusqu'au mélange, et, pour empêcher que quelques matières mal brûlées ne s'échappent à

l'extrémité du tube D, on y porte quelques charbons ardents. Quand le dégagement de l'acide carbonique a cessé, on casse la pointe du tube A, et, au moyen d'un gazomètre, on introduit de l'oxigène pour achever de brûler tout le carbone. En pesant de nouveau les tubes, on trouvera la quantité d'eau et d'acide carbonique contenue dans la substance à analyser.

Quant au moyen de doser l'azote, nous avons vu, quand nous avons parlé de ce corps, quels sont les procédés qu'on employait.

ACIDES ORGANIQUES.

Les acides organiques sont en très-grand nombre ; l'azote, en général, n'entre pas dans leur composition.

ACIDE ACÉTIQUE.

Cet acide, à l'état de pureté, cristallise en lames confuses ; sa densité est égale à 1,06296. Il est soluble dans l'eau et l'alcool ; sa formule en équivalents chimiques est représentée par $C^4H^3.O^3.HO$. Cet acide est très-répandu dans la nature. Il existe dans presque tous les liquides, soit libre, soit à l'état d'acétate de potasse. On le rencontre encore dans les circonstances de la fermentation et de la putréfaction. Au contact de l'air, en présence du noir de platine, il s'oxide et passe à l'état de vinaigre.

Préparation. — Le vinaigre peut s'obtenir au moyen de la fermentation de l'alcool ou du vin au contact de l'air, mais il faut le concentrer en le distillant. On le prépare, dans les laboratoires, au moyen de l'acétate de cuivre qu'on distille dans une cornue de verre qu'on chauffe à une température inférieure au rouge. La liqueur est colorée en vert par un peu d'acétate de cuivre ; mais au moyen d'une nouvelle distillation, on obtient un liquide incolore qu'on nomme *vinaigre radical.*

On prépare aussi, dans le commerce, du vinaigre en distillant du bois dans des cylindres en fonte. Les gaz combustibles qui se dégagent servent à l'alimentation du foyer. Les produits de la distillation sont très-impurs, ils contiennent du goudron et des huiles essentielles. On sature par le carbonate de chaux qui fait déposer une partie du goudron, puis on verse du sulfate de soude dans la liqueur décantée. Il y a production d'acétate de soude et de sulfate de chaux qui se précipite. On décante et on chauffe le résidu jusqu'à carbonisation complète du goudron, et on distille l'acétate rendu pur

par plusieurs cristallisations; et, au moyen de l'acide sulfurique, on obtient l'acide acétique qui se volatilise, et il reste du sulfate de soude.

ACÉTATES.

Ils sont tous solubles, excepté celui d'argent et de protoxide de mercure. Leur principal caractère est de donner de l'acide acétique par addition d'acide sulfurique.

ACIDE FORMIQUE.

Cet acide avait été confondu avec l'acide acétique. Il s'obtient en écrasant des fourmis rouges dans un mortier, et en soumettant à la distillation. C'est un liquide incolore, d'une odeur vive et pénétrante; sa formule est $C.^2 H. O.^3 H. O$, et a pour densité 1,253.

ACIDE OXALIQUE.

Cet acide se rencontre très-abondamment dans la nature. Cristallisé, il renferme trois équivalents d'eau, et a pour formule $C^2 O^3$ 3 H. O. Il se prépare en traitant l'amidon ou de la mélasse par l'acide azotique bouillant. Il se dépose en cristaux qu'on redissout, et on fait cristalliser de nouveau pour l'avoir pur. Cet acide est le plus oxigéné de tous les acides organiques. Tous les sels formés par l'acide oxalique sont insolubles dans l'eau, à l'exception des oxalates alcalins et ceux de chrôme, de fer et de manganèse.

Avec les sels de chaux, l'acide oxalique donne un précipité d'oxalate de chaux insoluble dans tous les acides végétaux.

ACIDE MELLITIQUE.

Il a pour formule $C.^4 O^3 H. O$. Il s'extrait d'un minéral appelé *mellite*. C'est un mellitate d'alumine. On traite cette pierre réduite en poudre par du carbonate d'ammoniac, et on précipite l'acide par de l'acétate de plomb.

ACIDE LACTIQUE.

Cet acide existe dans toutes les sécrétions animales et a pour formule $C.^6 H.^5 O. HO$. Il est incolore. Il forme des sels solubles avec toutes les bases.

ACIDE TARTRIQUE.

Cet acide s'extrait de la *crême de tartre* qu'on dissout dans l'eau, et dans laquelle on fait tomber de la craie. Le tartrate de chaux se dépose, et, par addition de chlorure de calcium dans les eaux-mères, il se forme un nouveau dépôt de tartrate

de chaux qu'on traite par l'acide sulfurique étendu : l'acide tartrique sera séparé.

Cet acide est très-soluble dans l'eau, mais moins dans l'alcool. Il a pour formule $C^4 H^2 O^5 HO$.

Tartrates.

Le plus important est le tartrate double d'antimoine et de potasse ; il porte le nom d'*émétique*, et est représenté par la formule

$$C^4 H^2 O^5 KO + C^4 H^2 O^5 SbO^3 + 2 HO.$$

Ce sel se produit en saturant une dissolution chaude de crême de tartre par l'oxide d'antimoine. C'est le meilleur vomitif que l'on connaisse.

ACIDE MALIQUE.

Cet acide a pour formule $C^8 H^4 O^8 2 HO$.

Il est blanc, inodore, cristallisant en choux-fleurs.

ACIDE TANNIQUE.

Cet acide est connu sous le nom de *tannin*. Cette substance se trouve sur la feuille de chêne. Sa propriété la plus remarquable et la plus essentielle est de former avec la gélatine un composé insoluble et imputrescible. C'est sur cette propriété qu'est fondé le tannage des peaux.

ACIDE GALLIQUE.

Cet acide a pour formule $C^7 HO^3 2HO$. Il cristallise en longues aiguilles incolores et d'une saveur sucrée. Il se prépare au moyen d'une infusion de noix de galle qu'on expose pendant longtemps au contact de l'air. Il se forme aussi de l'acide *ellagique*. L'acide gallique donne, avec les sels de fer au maximum, un précipité noir abondant. Soumis à l'action de la chaleur, il donne naissance à de l'acide pyrogallique et métagallique. De même l'acide tannique, sous cette influence, engendre les acides pyrotannique et métatannique.

ACIDE CITRIQUE.

L'acide citrique cristallise en prismes. Il a une saveur agréable, mais très-acide. On l'extrait du jus de citron qu'on sature par de la craie. Le citrate formé est ensuite traité par de l'acide sulfurique qui laisse déposer l'acide citrique $C^{12}H^5O^{11} 3HO$.

On emploie cet acide à la confection des toiles peintes, soit comme mordant, soit pour raviver les couleurs.

ALCALIS ORGANIQUES.

Cinchonine . . .	$C^{20}\ H^{12}\ Az\ O$	Quinquina.
Quinine	$C^{20}\ H^{12}\ Az\ O^{2}$	
Aricine	$C^{20}\ H^{12}\ Az\ O^{3}$	
Morphine . . .	$C^{35}\ H^{20}\ Az\ O^{6}$	Opium.
Codéine	$C^{35}\ H^{20}\ Az\ O^{5}$	
Narcotine. . . .	$C^{35}\ H^{20}\ Az\ O^{12}$	
Strychnine . . .	$C^{44}\ H^{23}\ Az^{2}\ O^{4}$	Noix vomique.
Brucine	$C^{44}\ H^{25}\ Az^{2}\ O^{7}$	

Nicotine	$C^{10}\ H^{8}\ Az$	Tabac.
Conine	$C^{16}\ H^{16}\ Az$	Ciguë.
Aniline	$C^{12}\ H^{7}\ Az$	Produit de l'action de la potasse sur l'indigo.
Quinoléine	$C^{38}\ H^{20}\ Az$	Réaction de la potasse sur la quinine.

Les bases minérales solubles précipitent les alcalis organiques de leurs sels dissous dans l'eau. Quand la base minérale est insoluble et que l'alcali organique peut se dissoudre, le contraire a lieu.

SUBSTANCES FORMÉES SEULEMENT DE CARBONE, D'OXIGÈNE ET D'HYDROGÈNE.

AMIDON.

Cette substance est très-répandue dans la nature, et se rencontre dans toutes les parties des plantes. On avait cru pendant longtemps que l'amidon était un principe immédiat cristallisé ; mais M. Raspail a fait connaître que c'était un véritable organe. Il est solide, blanc, composé de grains de forme ovoïde.

L'amidon s'obtient avec la pomme de terre ou les céréales.

En présence avec l'acide nitrique, il se dissout complètement, mais par addition d'eau, il se dépose une poudre blanche insoluble qui a pour composition $C^{12}O^{3}H^{9}AzO^{5}$. Cette substance a été nommée *xiloidine*.

Avec l'acide sulfurique, on obtient de la *dextrine* qui, chauffée plus longtemps, se transforme en sucre appelé *glucose*.

Les céréales, mais particulièrement l'orge, développent par la germination une substance particulière qu'on a nommée *diastase*. Elle se produit à la base des radicelles et des pousses. Cette substance s'extrait en broyant l'orge nouvellement germe

qu'on humecte d'un peu d'eau : la diastase est précipitée par l'alcool qui ne la dissout pas.

La *dextrine* est isomérique avec l'amidon. On l'obtient en exposant l'amidon à une température de 140°, ou en le maintenant à une température de 70 à 75° sous l'action de l'eau et de l'acide sulfurique ou de la diastase.

Cellulose. C'est une substance qui se rencontre dans le tissu cellulaire de toutes les plantes ; elle a la composition de l'amidon. La cellulose s'obtient en traitant de la charpie par l'acide chlorhydrique concentré qui la désagrège mécaniquement ; on lave ensuite avec de l'eau ammoniacale et de l'eau distillée.

La *pomme de terre* est formée d'un tissu vasculaire et cellulaire donnant naissance à des tubercules. La fécule est renfermée dans les cellules. Cette substance est originaire du Chili.

Le terrain le plus convenable à sa production ne doit être ni trop sec ni trop humide. Un hectare de terrain contient environ :

21,000 kil. de pommes de terre et 5,119 kil. de matière sèche.

La pomme de terre renferme de 72, 75 à 78 p. 100 d'eau, et 17, 20 et 22 p. 100 de fécule.

Fabrication de la fécule de pomme de terre.

On commence d'abord par essayer les pommes de terre.

Pour cela on en prend quelques-unes dans chaque espèce de terrain, on les coupe en tranches, on les pèse et on les dessèche. La quantité de fécule doit être les 0,05 près du poids de la matière sèche.

Pour laver la pomme de terre, on emploie un laveur mécanique. C'est un cylindre incliné qui tourne dans l'eau. Les pommes de terre sont placées dans une trémie ; le cylindre est composé d'un bâti en fonte, à claire-voie dans sa longueur. On remonte les pommes de terre par une machine à augets qui les rejette sur un plan incliné, lequel les mène à la râpe.

Il faut que cette râpe ait une très-grande vitesse (500 tours par minute). Elle consiste en un bâti en fonte de 3 mèt. 50 cent. (10 pieds 8 pouces) de hauteur sur 40 centim. (1 pied 3 pouces) de diamètre, muni de règles en fer ou en bois maintenues solidement à l'extérieur. On divise le cylindre en 8 divisions ; et sur les règles on fixe des lames de scie ; de là la pulpe tombe dans un tamis qui sépare cette pulpe de la fécule. Pour avoir

un tamis convenable, il convient de faire des essais : on se sert d'un tamis en crin sur lequel tombe un filet d'eau, l'on agite avec une brosse; mais ce système ne convient pas pour de grandes exploitations de fécule. On emploie avec avantage le tamis de Saint-Etienne. C'est un cylindre double dont l'extérieur est une toile métallique ou en lames de métal percées de trous; la pulpe tombe dans un premier tamis agité par une brosse. On se sert actuellement d'un tamis représenté *Pl.* IX, *fig.* 32. Il est formé de châssis en toile métallique de 1 mètre 50 cent. sur 1 mètre (4 pieds 7 pouces sur 3 pieds), et espacés les uns des autres de 15 centim. (5 pouces 7 lignes) sur un plan incliné de 2 mètres (6 pieds) de longueur. A l'extrémité se trouve un réservoir destiné à recevoir la pulpe. Il y a deux systèmes de tamis accolés les uns aux autres.

Fabrication du gruau de pomme de terre, ou vermicelle.

On commence par chauffer à la vapeur pendant deux heures. On met sur une chaudière en fonte un tonneau percé de trous, dans lequel sont les pommes de terre. Quand elles sont cuites, on les épluche immédiatement et on les verse dans le vermicelloire. Ce vermicelloire se compose d'un cylindre percé de trous aussi, dans lequel se meut un piston. On emploie aussi deux cylindres sur lesquels est montée une trémie.

On fait sécher dans des fours. Ce produit se vend sous le nom de gros ou petit gruau de pomme de terre. Il est plus nutritif que la pomme de terre.

Fabrication du sirop de fécule de pomme de terre par l'acide sulfurique.

L'appareil se compose d'une chaudière cylindrique en plomb, fermée par un couvercle en bois percé d'un trou de 40 centim. (1 pied 3 pouc.) de diamètre, par lequel passe un agitateur, qui doit tenir sans cesse la matière en mouvement (*fig.* 34).

On met dans ce vase un liquide contenant en eau quatre à cinq parties pour une de fécule, et deux parties d'acide sulfurique. On fait chauffer ce mélange jusqu'à l'ébullition, puis on y ajoute de la fécule sèche en poudre. On doit verser très lentement, la masse devient alors pâteuse. L'ébullition se prolonge jusqu'à ce que tout soit devenu liquide comme de l'eau; il suffit pour cela de 15 à 20 minutes. Cette opération terminée, il faut enlever l'acide sulfurique. On se sert, dans ce cas, de carbonate de chaux réduit en poudre, qu'on verse

jusqu'à ce qu'il n'y ait plus dégagement d'acide carbonique; on s'en assure par un papier de tournesol.

Pour séparer le sulfate de chaux, on verse le liquide sur un filtre, et la décantation s'opère au moyen d'un siphon en cuivre de 34 millim. (15 lignes) de diamètre intérieur. Le filtre se compose d'une caisse en bois doublée en cuivre, et dont le fond, garni d'une toile, est percé de trous. Le liquide filtré sort par une ouverture pratiquée au fond de ce vase. L'évaporation du sirop a lieu dans une chaudière à bascule jusqu'à 33° de Beaumé. Si on voulait décolorer le sirop, il faudrait filtrer sur un filtre de charbon en grains. Evaporé à 40°, le sirop cristallisé augmente de volume et brise les vases dans lesquels on le renferme.

2° *Appareil.*

Il diffère du premier par le mode de chauffage qui est plus économique. On détermine la vaporisation de l'eau qui élève la température dans le vase M (*fig.* 35) à plus de 100°. On mêle la fécule humide avec de l'eau, de manière à former une bouillie claire qui tombe en filet continu A. Cette pâte est continuellement agitée.

Le vase M est muni d'un tube T qui conduit les vapeurs dans une cheminée d'appel C. Quand la saccharification est faite, on sature comme précédemment, on laisse déposer le sulfate de chaux, et on soutire à clair. L'évaporation se fait dans une chaudière Taylor et Martineau.

Dans cette opération, l'acide sulfurique s'introduit dans le tissu spongieux, désagrège et rend la fécule complètement soluble. C'est de la dextrine.

Emplois de la fécule.

La fécule de pomme de terre se mêle avec la farine, s'emploie dans la pâtisserie et dans le pain : là, elle se conserve, en quelque sorte, indéfiniment, à cause de son insolubilité dans l'eau. Il peut en entrer 0,15 dans le pain, sans le rendre mauvais.

La fécule s'emmagasine par les spéculateurs, pour compenser les mauvaises récoltes.

Elle s'emploie encore dans la fabrication du *tapioca* ou gruau de pomme de terre : c'est de la fécule agglomérée.

On hydrate la fécule dans un lieu humide, ou bien, en ne la desséchant pas tout-à-fait; on la tamise au-dessus d'une plaque de métal chauffée au-delà de 100° : il y a formation

d'empois. Les flocons, en se desséchant, prennent sensiblement une forme sphérique.

SUCRES.

Toutes les matières organiques qui possèdent une saveur douce, qui sont solubles, et qui, sous l'action de certaines substances appelées *ferments*, se changent en acide carbonique et alcool, sont comprises sous le nom de *sucres*.

On connaît deux espèces de sucre; plusieurs chimistes en admettent trois.

1° *Sucre de cannes*, qui se trouve dans un roseau de 6 à 8 mètres (18 à 24 pieds) de hauteur, appelé *canne à sucre*. Il contient 18 à 20 p. 100 de son poids en sucre.

Ce sucre est identique avec le sucre qu'on extrait de la betterave, de l'érable, du melon, des châtaignes et du lilas. Il a pour formule :

$$C^{12} H^9 O^9 + 2 HO.$$

2° *Sucre de raisin.* Il se trouve en très-grande quantité dans ce fruit. On l'obtient par l'action des acides ou de la levure de bière sur le sucre de cannes; il est identique avec le sucre d'amidon.

Le sucre existe encore dans les urines des diabétès.

On a donné à ce sucre le nom de *glucose*. Il a pour formule :

$$C^{12}, H^{14}, O^{14}.$$

FABRICATION DU SUCRE DE BETTERAVE.

Culture de la betterave.

Pour la culture de la betterave, il faut un sol léger et profond.

On préfère la variété de betteraves blanches; cette variété a un sucre plus riche; il contient moins de matières étrangères. La betterave peut se cultiver tous les ans dans le même terrain, sans aucun inconvénient. On engraisse les terres avec du sang desséché, de la chair musculaire cuite, des râpures d'os ou de corne. On doit mettre ces engrais à raison de 500 kilog. (1000 liv.) par hectare. Quand on met des engrais qui se décomposent spontanément, tels que les boues de Paris, les fumiers, etc., il faut les mettre avec beaucoup de précaution; car, par une trop grande quantité, la betterave posséderait un mauvais goût, et serait par conséquent de mauvaise qualité.

Les engrais pour les cannes sont les mêmes que pour la betterave.

Composition de la Betterave.

Elle est formée d'un tissu vasculaire qui occupe le centre de la betterave, et muni de tubes qui communiquent avec la plante (*fig.* 36). Autour de ce tissu se trouve une couche plus ou moins épaisse de tissu cellulaire, qui reçoit les sucs que secrète le tissu vasculaire. Autour de ce dernier tissu, il existe un autre tissu vasculaire, ainsi de suite. Plus le tissu vasculaire est fort, plus la betterave est difficile à entamer.

Quand la betterave a pris un assez grand développement, il se forme près des feuilles une chambre où se réunissent les sucs secrétés par les tissus vasculaires : on doit rejeter les betteraves qui se trouvent dans ce cas, car elles contiennent les mêmes produits que la feuille. La grosse racine se nourrit par les radicelles qui viennent prendre naissance sur le tissu vasculaire.

Composition de la Betterave.

Eau.	85 p. 100	100.
Sucre.	9,5	
Tissu ligneux. . .	3	
Diverses substances.	2,5	

Elle contient aussi :

Albumine,
Acide pectique,
Matière azotée,
Matière colorante,
id. aromatique,
id. grasse,
Chlorophyle,
Huile essentielle, âcre,
Acide malique,
Malates de { potasse, chaux, ammoniac,
Oxalates. , Phosphates. } de chaux,
Nitrates,
Chlorure de potassium et de sodium.

Elle contient aussi de la silice et du soufre.

Réactions qui se passent dans la fabrication du sucre de betteraves.

Autrefois on employait de l'acide sulfurique : cet acide coa-

gulait l'albumine, et donnait naissance à une écume assez solide, en formait du sulfate de potasse avec le malate de potasse, et ralentissait les fermentations. Maintenant on n'emploie plus cet acide, car il altère la qualité du sucre. Dans toutes les fabriques on se sert de la chaux; elle détermine aussi la coagulation de l'albumine, mais à un moindre degré que l'acide sulfurique. Elle précipite l'acide pectique à l'état de pectate de chaux; réagit sur la matière colorante, et la fait passer au jaune et au vert.

Avec le malate de potasse il se forme du malate de chaux, et la potasse caustique est mise à nu. Cette potasse nuit beaucoup pour la confection du sucre. On pourrait, du reste, la faire disparaître au moyen de sulfate de chaux.

Emploi du charbon animal.

Le charbon animal doit être employé immédiatement après l'opération de la chaux.

Le charbon animal sature la chaux et l'enlève complètement, ainsi que les sels calcaires et la matière colorante, non en totalité. Il précipite plusieurs matières étrangères que l'on ne connaît pas encore bien, mais il n'enlève rien au sucre.

Traitements de la Betterave.

On commence par arracher la betterave aussitôt qu'elle est mûre; c'est vers le mois de septembre. On coupe les feuilles que l'on destine aux bestiaux. Les feuilles mortes restent sur le terrain pour servir d'engrais.

Il importe de ne pas jeter les betteraves, pour ne pas les meurtrir, sans quoi les sucs, étant une fois en contact, se décomposeraient. Quand on ne les emploie pas de suite, il faut les conserver dans des celliers où la température varie le moins possible.

Les betteraves qui doivent être traitées en dernier lieu sont placées dans des silos, de manière que les produits de la fermentation puissent s'échapper.

Les silos sont des fosses très-longues, creusées dans un terrain sablonneux (*fig.* 37). De distance en distance, on place des séparations en fagots, qui servent de cheminées pour le dégagement des gaz. La betterave ainsi placée peut se conserver pendant près d'un an.

EXTRACTION DU SUCRE DE CANNES.

Les cannes perdent leur jus sous l'influence de la pression.

L'appareil se compose d'un laminoir à trois cylindres (*fig*. 38). La canne passe successivement entre ces trois cylindres, et tout le jus exprimé est reçu dans une bassine.

Pour la betterave, on ne pourrait pas employer la pression immédiatement ; car tout le jus ne serait pas exprimé.

On coupe d'abord la betterave en tranches, avec une râpe semblable à celle qu'on emploie pour la fécule de pommes de terre.

Le cylindre dévorateur fait six cents tours par minute. En avant de ce cylindre se trouve une coulisse qui présente la betterave dans le sens de sa longueur.

Pour laver la betterave, on emploie un laveur identique à celui de la fécule.

Après avoir réduit la betterave en pulpes, on en extrait le jus au moyen de la presse hydraulique, qui a remplacé la presse à cylindre. La pulpe est placée sur des claies en osier dur, dans des sacs.

Après une première expression, on ramasse la pulpe, que l'on donne aux bestiaux ; mais quelques fabricants ont trouvé moyen d'en extraire encore du jus : il suffit pour cela d'exposer ces sacs à l'action d'une température brusque, par un courant de vapeur, ou bien en plongeant les sacs dans de l'eau bouillante. Dans cet état, toutes les utricules se déchirent, et le jus contenu s'en échappe. On a disposé, à cet effet, des coffres doublés en cuivre mince, et la vapeur arrive par des tubes latéraux *a a'* (*fig*. 39).

On peut encore en extraire le jus en trempant les tranches de betterave dans de l'eau bouillante. Avec ce perfectionnement, on a obtenu 91 p. 100 de sucre ; mais ce procédé présente de graves inconvénients : le liquide à évaporer est en plus grande quantité, et la défécation est plus difficile. Cela paraît tenir à un excès d'acide malique. Pour opérer par ce dernier mode, on fait usage de tonneaux dans lesquels est placée la betterave coupée par tranches de 7 ou 9 millimètres (3 ou 4 lignes) d'épaisseur. On amoncèle ces tranches dans les tonneaux remplis d'eau, dont on élève la température. La vapeur arrive par un tube plongeur. Pour obtenir un épuisement complet, on dispose en cercle un nombre suffisant de tonneaux (*fig*. 40). On se sert aussi d'un siphon renversé (*fig*. 41). La betterave arrive en A, et est promenée sur une chaîne à chapelet, et l'eau arrive en sens contraire par l'ouverture B.

SIROP.

A la manière dont se comporte le sirop à l'ébullition, on voit s'il est bon. Il faut que le liquide bouille avec facilité, et qu'il ne mousse pas. L'évaporation lente est toujours fâcheuse ; elle doit se faire le plus vite possible, et durer moins d'un quart-d'heure. On se sert alors avec avantage de l'appareil de Brame-Chevalier, qui donne 8 p. 100 au lieu de 6.

Pour reconnaître si la cuite est terminée, on plonge l'écumoire dans le liquide, en la retirant vivement et verticalement. Avec le doigt, on reconnaît le degré de viscosité. Le filament doit se casser au milieu, et se recourber en crochet à l'extrémité. L'évaporation s'exécute au contact de l'air ; il a été reconnu qu'il n'avait aucune influence fâcheuse sur la cuite du sirop.

Quand le sucre est arrivé au degré de cuite convenable, il faut le refroidir pour le faire cristalliser ensuite. Pour le sucre de betteraves, on réunit le produit de plusieurs cuites (8 à 10) dans un vase appelé refroidissoir. Quand la cristallisation commence, on met le sucre dans les *formes*, à la température de 40°. Ces moules, ou cristallisoirs, ont plusieurs formes : 1° les bâtardes, de 65 à 97 centimètres (2 à 3 pieds) de large, et de 65 à 97 centimètres (2 à 3 pieds) de profondeur ; on bouche les trous avec un tampon mouillé, et on laisse le sucre pendant 30 à 40 heures ; 2° les cristallisoirs en bois, munis de cuivre étamé ou de plomb. Dans les colonies, on se sert de vases tout-à-fait plats.

RAFFINAGE DU SUCRE.

Dans le sucre brut, on compte 5 p. 100 de matières étrangères; les proportions varient; mais le sucre de qualité moyenne contient 95 p. 100 de sucre blanc.

Procédé ancien.

On dissolvait le sucre dans l'eau de chaux; l'avantage qu'on y trouvait était de saturer les acides contenus dans le sucre; mais il y avait excès de base. Cette eau de chaux contenait aussi de la potasse en dissolution, corps très-nuisible à la cristallisation.

Cette chaudière pouvait clarifier 25 à 30 mille kilogrammes (50 à 60 mille livres) de sucre brut. Le sirop, en sortant de cette chaudière, passait sur un filtre et se rendait dans la chaudière d'évaporation.

Le sucre, dissous dans l'eau, était chauffé avec du sang : ce sang, en se coagulant, formait une écume qui clarifiait toute la masse du sirop; l'écume devait être enlevée, de manière à ce que le sirop fût d'une limpidité parfaite ; l'opération était longue et très-difficile. Quand le sirop était clair, on le versait sur un filtre garni d'une toile qui arrêtait l'albumine; ensuite on plaçait le sirop dans la chaudière d'évaporation. La cuite durait environ une heure.

Procédé nouveau.

On a remplacé l'eau de chaux par le charbon animal. On attend, pour mettre le noir, que le sirop soit près de son point d'ébullition. La quantité de charbon qu'on verse est d'environ 10 p. 100.

On filtre ensuite. Les filtres ont beaucoup varié dans leur composition. Le charbon animal a été employé sous forme de grains; la propriété décolorante est alors augmentée : cela tient à une surface plus grande qu'il présente au sirop.

Filtres.

Le perfectionnement le plus remarquable a été amené par M. Taylor.

Ce filtre consiste en un coffre en bois (*Pl.* IX, *fig.* 42), doublé de cuivre mince. A la partie supérieure se trouve un réservoir plat en forme d'entonnoir, où on verse le sirop. Dans l'intérieur se trouvent des parties coniques, terminées par des ajutages coniques, entourés en haut d'un anneau (*fig.* 43) auquel on attache les sacs. Ces sacs, de 16 centimètres (6 pouces) de diamètre sur 1 mètre (3 pieds) de longueur, se remplissent de liquide.

Lavage des tonneaux.

Autrefois, pour laver les tonneaux, on était obligé de râcler l'intérieur; ce moyen était vicieux, parce qu'on entraînait en même temps du bois; en outre, on perdait beaucoup de temps à cette opération. M. Roth a imaginé l'appareil suivant : il fait arriver (*fig.* 46) de la vapeur dans le tonneau A, et cette vapeur, en se condensant, entraîne la mélasse, qui coule dans les rigoles R R'.

Troisième procédé pour les sirops de sucre.

On met le sirop dans une chaudière à clarifier, avec du noir

fin et du sang. Après l'ébullition, on laisse déposer. On soutire dans la chaudière à clarifier, de là sur le filtre Taylor, et enfin la clairce se rend sur le filtre Dumont (*fig.* 45).

Cuite du sirop.

Il est inutile de cuire les sirops dans le vide; on se sert de l'appareil de Roth (*fig.* 46).

1 chaudière de	2.m	de diam.	37,500 kil. de betteraves, ou 300 hectolitres de jus, par l'appareil de Roth.
1 *id.*	1	*id.*	

Pour la cuisson du sucre, on se sert aussi de l'appareil de Brame-Chevalier; l'évaporation ne dure que 8 minutes.

Il existe un troisième sucre qu'on retire de certains fruits, mais que, jusqu'à présent, on n'a pu faire cristalliser. Il existe dans le sucre de cannes, et on le retrouve dans la mélasse, d'où on ne peut le retirer.

En s'unissant avec la chaux, la baryte et l'oxide de plomb, le sucre forme des *saccharates*. Ce ne sont pas de véritables sels, car le sucre devrait être rangé parmi les acides; mais il ne s'unit pas à la potasse et à la soude.

SUCRE DE LAIT, OU LACTINE.

C'est une substance qu'on retire du lait. Ce corps est blanc, dur, d'une densité égale à 1,54. C'est à sa présence que le lait doit sa saveur douce.

Traité par l'acide nitrique, il donne un acide qui porte le nom d'acide *mucique*, et qui a pour formule : $C^8 H^4 O^7 HO$.

SUCRE DE MANNE.

Le sucre de manne, ou mannite, existe dans un purgatif appelé *manne*. On le rencontre dans les sucs qui proviennent de l'exsudation de quelques arbres, et dans les champignons, le céleri et les oignons. La mannite a pour formule :

$$C^{12} H^7 O^6.$$

Elle se prépare en traitant la manne par l'alcool bouillant.

La mannite se dissout et cristallise par le refroidissement.

Avec de l'acide nitrique, la mannite donne naissance à de l'acide oxalique.

GOMMES.

Les gommes proviennent de l'exsudation de plusieurs arbres, tels que le prunier, l'abricotier, le cerisier, etc.

Leur caractère principal est de donner de l'acide mucique sous l'action de l'acide nitrique.

Dans le commerce, on distingue cinq espèces de gommes :

1° Gomme arabique ;
2° *id.* adragante ;
3° *id.* du Sénégal ;
4° *id.* de Bassora ;
5° *id.* du pays.

Ces différents genres peuvent être ramenés à trois types chimiques, dont ils ne sont que des mélanges.

Les trois principes immédiats qui les composent sont : l'*arabine*, la *cérasine* et la *bassorine*.

ALCOOL.

L'alcool s'obtient en distillant les légumes dans lesquels il s'est produit par la fermentation.

Pour concentrer l'alcool, on le renferme dans une membrane animale, telle qu'une vessie, par exemple, ou bien dans un vase à large ouverture et fermé par une de ces membranes, qui, quoique perméables à l'eau, sont impénétrables par l'alcool. L'alcool se volatilise donc lentement et se concentre jusqu'à 90 et 95 centièmes.

On peut aussi le distiller par de la chaux caustique. Dans cet état, il porte le nom d'*alcool absolu* ou de *phlegmé*.

La densité de l'alcool est de 0,7947 à 15°. Il bout à 78°,4, et sa densité alors est exprimée par le nombre 1,613. Il brûle avec une flamme jaune, et cette flamme devient bleue quand l'alcool est étendu d'eau.

Sous l'action de la chaleur, l'alcool se décompose en gaz des marais, gaz oléfiant, eau, acide carbonique et *aldéhyde*. L'étincelle électrique détermine sa combustion. L'équivalent de l'alcool est représenté par $C^4 . H^6 . O^2$.

ÉTHER SULFURIQUE OU OXIDE D'ÉTHYLE.

Il se prépare en distillant des poids égaux d'acide sulfurique et d'alcool. Il a pour densité 0,72.

ÉTHER HYDROCHLORIQUE.

Il s'obtient en distillant de l'alcool saturé par l'acide chlorhydrique. Sa densité est de 0,874.

ÉTHERS DE LA TROISIÈME CLASSE.

Ils s'obtiennent en faisant réagir sur de l'alcool l'acide que l'on veut faire entrer en combinaison.

Tous ces éthers ont une odeur aromatique et une formule générique C. H^5. O. A.

ACIDE SULFOVINIQUE.

Il s'obtient en mettant en contact à la température ordinaire des poids égaux d'acide sulfurique et d'alcool. Sa formule est représentée par C^4. H^5O, $2\,SO^3$, HO.

Tous les sels de cette famille d'acides sont très-solubles dans l'eau et cristallisent très-bien. Quand on les fait bouillir avec de l'eau, on obtient un sulfate acide et une distillation d'alcool.

Soumis à l'action de la chaleur, un sulfovinate donne de l'acide carbonique, de l'acide sulfureux, de l'eau, de l'alcool, de l'éther, carbure d'hydrogène, et distille, en outre, une substance oléagineuse appelée *huile de vin pesante*, dont la formule est :

$$C^4.\ H^5O,\ SO^3 + C^4H^4,\ SO^3.$$

Si on fait bouillir cette huile avec de l'eau, il s'en sépare de l'acide sulfovinique, et il se produit en même temps une nouvelle substance appelée *huile de vin légère*, dont la formule est : $C^4.H^4$.

ALDÉHYDE.

Elle se rencontre dans les produits de l'acétification de l'alcool. Sa formule est : $C^4.H^4.O^2$.

L'aldéhyde se prépare en distillant, à une douce chaleur, un mélange d'acide sulfurique, d'alcool et de bi-oxide de manganèse.

Cette substance est liquide, et entre en ébullition à 21°.

ACÉTAL.

Cette substance se produit encore dans les réactions des acides nitreux et nitrique sur l'éther, et sous l'influence du noir de platine et de l'alcool exposés à l'air. Dans cette circonstance, on obtient en même temps de l'*acétal*, ou acétate tribasique d'oxide d'éthyle.

CHLORAL.

En faisant passer un courant de chlore desséché sur de l'al-

cool, il se forme un composé $C^4.Cl^3O,HO$, qui porte le nom de *chloral.*

CHLOROFORME.

Le chloral a une action remarquable sur les bases, il donne des formiates et un liquide éthéré, le *chloroforme*, qui a pour formule $C^2.HCl^3$.

ESPRIT DE BOIS.

En distillant le bois, on obtient, comme nous l'avons déjà vu, un principe composé, l'*acide acétique*; mais il se produit en outre une substance liquide, d'une odeur alcoolique, soluble dans l'eau, et très-combustible, à laquelle on a donné le nom d'*esprit de bois.*

L'esprit de bois a pour formule $C^2.H^4.O^2$.

C'est un liquide incolore qui bout à 66°,5.

Il a pour densité 0,8 à 20°.

HUILE DE POMMES DE TERRE.

Liquide incolore, d'une odeur très-forte. Elle bout à 134°. Cette huile a pour formule $C^{10}.H^{12}.O^2$. Elle a été étudiée par MM. Dumas et Cahours.

CORPS GRAS.

Les substances grasses et onctueuses qu'on extrait des plantes et des graines sont généralement liquides, elles portent le nom d'*huiles.* Celles qui proviennent des animaux sont demi-fluides et s'appellent *graisses*. Quand ces dernières sont solides, elles prennent le nom de *suifs*. Tous ces corps sont compris sous la dénomination de *corps gras neutres*.

Les corps gras sont représentés par trois principes immédiats : l'*oléine*, qui est une substance liquide, la *stéarine* et la *margarine*, qui sont solides.

OLÉINE.

L'oléine s'obtient en comprimant un corps gras entre plusieurs doubles de papier buvard, le liquide qui s'en échappe est de l'oléine, mais non à l'état de pureté, car elle dissout toujours un peu de stéarine.

L'oléine est un liquide sans odeur ni saveur, incolore, insoluble dans l'eau. Lorsqu'on la soumet à la distillation, elle donne naissance à l'acide *sébacique* qui a pour formule $C^{10}H^8.O^3,HO$.

STÉARINE.

La stéarine s'obtient en dissolvant du suif dans l'alcool ou l'essence de térébenthine bouillante. Elle se dépose par le refroidissement. On la dissout plusieurs fois dans l'alcool, et on la dessèche dans du papier buvard jusqu'à ce qu'elle fonde à 62°.

La stéarine est solide, friable, formée de lamelles blanches superposées. Sa formule est $(C^{68}.H^{66}.O^5)$, $C^6.H^7.O^5$.

Par l'action de la chaleur, elle se transforme en *glycérine* et en acide *stéarique*.

MARGARINE.

Lorsqu'on a maintenu du beurre quelque temps en fusion et qu'on le laisse refroidir, on trouve des grumeaux cristallins qu'on exprime comme dans la préparation de la stéarine, et qu'on dissout dans de l'alcool éthéré. Le produit de ces opérations est la margarine, qui doit être fusible à 48°.

HUILES.

Elles se divisent en deux classes :

1° *Huiles siccatives :* ce sont celles qui se solidifient au contact de l'air.

2° *Huiles non siccatives :* elles résistent à l'air sans aucune altération.

ÉLAÏDINE.

Les huiles de la première classe absorbent l'oxigène de l'air et forment un composé solide appelé *élaïdine*, qui remplace la substance liquide de l'huile.

Parmi les huiles siccatives, on compte celles de *lin*, de *noix*, de *chènevis*, d'*œillet*, etc. Les huiles non siccatives sont celles d'*olive*, de *colza*, de *navette*, d'*amande douce*, de *ricin*.

L'acide hypoazotique solidifie les huiles non siccatives, mais n'exerce pas d'action sur les autres. C'est donc un moyen de reconnaître, dans le commerce, les huiles d'olive qui pourraient être mêlées avec d'autres moins bonnes et siccatives, telles que l'huile d'œillet.

La stéarine en contact avec de la potasse et de l'eau se transforme en *acide stéarique* qui s'unit à la potasse pour former un stéarate de potasse, tandis qu'il se sépare de ce nouveau sel une substance appelée *glycérine*, dont la formule est $C^6H^7O^5HO$

L'acte de la saponification ou de la combinaison d'un acide gras avec une base, consiste en ce que la base (la potasse ou

la soude) déplace la glycérine pour s'unir avec l'acide stéarique.

La margarine se change de même en acide *margarique* et en glycérine ; et l'oléine, en acide *oléique* et glycérine.

On peut donc considérer les corps gras comme des combinaisons d'acides spéciaux avec l'oxide de glycérine, dont celle-ci peut être chassée par une base telle que la potasse, en donnant naissance à la glycérine.

ACIDE STÉARIQUE.

Cet acide s'obtient en traitant le stéarate de potasse par l'acide chlorhydrique. C'est une masse blanche, brillante, d'une densité de 1,01, et fusible à 70°. Il a pour formule $C^{68}H^{66}O^{5}2HO$.

ACIDE MARGARIQUE.

Il ressemble beaucoup au précédent. Il fond à 60°, et a pour formule $C^{34}.H^{33}.O^{3}.HO$.

ACIDE OLÉIQUE.

Il a pour formule $C^{44}.H^{39}.O^{4}.HO$. On l'obtient au moyen d'un oléate de plomb soluble qu'on traite par l'hydrogène sulfuré qui donne du sulfure de plomb et isole l'acide oléique.

L'acide nitrique transforme l'acide oléique en acides *elaïdique*, *sabérique*, *pimélique*, *adipique*, *lipique*, *azoteïque*, qui sont tous volatils.

GLYCÉRINE.

Elle s'obtient en saponifiant par l'oxide de plomb une huile quelconque. Il se produit un oléate, un margarate et un stéarate insolubles, et la glycérine reste en dissolution. C'est un liquide incolore, d'une saveur sucrée, incristallisable.

FABRICATION DES SAVONS.

Dans le commerce on emploie la soude et la potasse. La potasse donne des savons mous, tandis que la soude forme des savons durs.

Savons durs.

Dans une chaudière en cuivre, ou même en maçonnerie, on met de l'huile d'olive, de colza, ou d'œillet, ou même du suif, avec de l'eau. On verse ensuite dans la chaudière une lessive faible de soude du commerce décarbonatée par de la chaux,

et on fait bouillir la liqueur, après quoi on ajoute une lessive un peu plus forte.

On arrête le feu et on enlève l'eau mêlée de glycérine qui s'est rassemblée à la surface. Le résidu est traité de nouveau par une forte solution alcaline que l'on fait bouillir jusqu'à ce qu'on n'aperçoive plus de globules de graisse en suspension. Le savon formé se dépose par le refroidissement. Ce savon est bleu, à cause des savons à base de fer et de cuivre qu'il renferme, et contient 15 p. 100 d'eau. Pour le blanchir on ajoute environ 45 p. 100 d'eau, et les savons métalliques insolubles se précipitent. Les savons marbrés, tels que ceux qui nous viennent de Marseille, sont ceux dans lesquels on n'a ajouté que 15 p. 100 d'eau. Ils sont formés de :

Eau	30 parties.
Soude	6
Acides gras	64

Les savons blancs sont composés de :

Eau	45,2
Soude	4,6
Acides gras	50

Savons mous.

Ils se préparent de la même manière que les précédents ; mais, au lieu de la soude, on emploie la potasse. Voici leur composition :

Eau	46,5
Potasse	9,5
Acides gras	44

Les savons transparents s'obtiennent en opérant dans l'alcool au lieu de l'eau.

PRÉPARATION DE LA CIRE.

La cire est un principe immédiat qui se trouve dans le pollen de toutes les fleurs, sur le duvet des prunes, dans les feuilles de chou, etc. On la retire aussi d'une certaine baie. Sa couleur est verte.

On trouve encore la cire dans la gomme lacque.

En France, ce sont les abeilles qui forment la cire. Elle est solide, blanche, demi-transparente. Elle possède peu d'odeur, mais brûle en répandant une odeur agréable. Elle est insolu-

ble dans l'eau, se dissout dans les huiles fixes. L'alcool en dissout une petite quantité (*cérine*). La partie non soluble se nomme *myricine*.

La cire est falsifiée dans le commerce; on y mélange du suif de mouton frais. Pour reconnaître cette fraude, on goûte la cire. La cire falsifiée fait tache sur les étoffes. On mélange aussi de la fécule et de l'amidon; dans ce cas, on traite par l'essence de térébenthine qui dissout la fécule.

Pour extraire le miel de la cire, on coupe les gâteaux en plusieurs morceaux. Le miel est désigné sous le nom de *miel vierge*. Les miels peuvent être vénéneux, d'après les pollens des plantes qui ont servi à la nourriture des abeilles. Pour épurer le miel, on le met dans une chaudière qui contient du charbon animal, et à l'ébullition on y verse des œufs battus. On filtre sur un filtre *Taylor*, muni à sa partie inférieure de charbon végétal. Il reste encore du miel dans les cellules: pour l'extraire, on presse de nouveau; mais il est de moins bonne qualité, car il contient des matières solubles végétales. On emploie ce miel dans la pharmacie vétérinaire, et pour la fabrication de la bière.

Pour extraire la cire, on remplit à moitié d'eau une chaudière ordinaire hémisphérique, dans laquelle on jette les gâteaux. La cire se fond en chauffant, et se rend à la surface du liquide; on la laisse se figer, puis on enlève le pain, et au moyen d'un instrument on se débarrasse des matières étrangères qui se trouvent à la base.

Blanchiment de la cire.

Il s'opère dans des chaudières, où on porte la température jusqu'à la fusion de la cire. Après avoir laissé déposer les matières étrangères, on soutire dans un cuvier rempli d'eau bouillante. On laisse de nouveau déposer. La cire est ensuite convertie en rubans, en la faisant tomber sur un cylindre mouillé qui la divise en feuilles très-minces. La cire ainsi travaillée est exposée à la rosée et au soleil, après quoi on la refond dans des moules qui ont une forme cylindrique ou rectangulaire. C'est dans cet état qu'on la livre au commerce.

FABRICATION DES BOUGIES STÉARIQUES.

On traite dans de grandes cuves en bois sept à huit mille kilogrammes de suif avec de l'eau, et 10 à 12 p. 100 de chaux caustique. La masse, traversée par un courant de vapeurs,

est sans cesse agitée. La saponification est terminée au bout de cinq à six heures. Il se dépose, par le repos, de l'oléate et de stéarate de chaux, tandis que l'eau contient de la glycérine en dissolution. Le savon calcaire réduit en poudre est mis en suspension dans l'eau chaude, et, au moyen de l'acide sulfurique, on précipite la chaux à l'état de sulfate et on isole les acides stéarique et oléique qui se rassemblent à la surface. Ces acides, par le refroidissement, forment un gâteau qu'on lave longtemps à la vapeur d'eau. L'acide stéarique, mêlé d'acide oléique, est coulé en briques auxquelles on fait subir une forte pression pour les débarrasser de l'acide oléique. On lave avec de l'eau chargée d'acide sulfurique, et l'acide stéarique est pur et parfaitement blanc. C'est alors qu'on le coule dans des moules où on a disposé des mèches.

HUILES ESSENTIELLES.

Elles sont presque toujours fluides, solubles dans l'eau à divers degrés, mais la proportion ne dépasse jamais un centième. La solubilité, dans l'alcool, des huiles essentielles est sans limite. Exposées au contact de l'air, elles se solidifient en se transformant en *résines*.

Les huiles essentielles se retirent des graines des plantes et des racines de certains végétaux, tels que *sassafras*, l'*iris*; des feuilles de *menthe*, de *sauge*, *de millepertuis;* des calices des fleurs, des écorces d'orange, de citron, etc. On distille ces substances avec de l'eau, et l'huile se sépare en se rendant dans le récipient de l'alambic.

ESSENCE DE TÉRÉBENTHINE.

Cette huile s'obtient en pratiquant des incisions dans les pins et les sapins. C'est un mélange de térébenthine et d'une résine formée sans doute par l'oxidation de cette substance. On distille la masse avec de l'eau pour obtenir l'essence de térébenthine, et le résidu qui provient de cette distillation porte le nom de *colophane*, *poix résine*, ou simplement *résine*. Pour avoir l'huile de térébenthine très-pure, on la distille une seconde fois sur du chlorure de calcium. C'est un liquide incolore, d'une densité égale à 0,86 et qui bout à 156°. Son équivalent chimique est $C^{20}.H^{16}$.

CAMPHRE.

Cette huile se rencontre dans le *laurus camphora* et dans

plusieurs espèces de lauriers. Le camphre vient en grande partie du Japon.

Le camphre est solide, facilement cristallisable. Il a pour densité 0,987, fond à 175° et entre en ébullition à 204°. Il a pour formule $C^{20}, H^{16}. O^{2}$.

NAPHTALINE.

C'est un carbure d'hydrogène dont l'équivalent est représenté par $C^{20}. H^{8}$; il se produit dans la distillation de la houille. Pour la purifier on l'exprime pour chasser les matières liquides, puis on l'introduit dans une capsule qu'on recouvre d'un dôme de papier. En chauffant jusqu'à volatilisation, la naphtaline se sublime contre les parois du cône, en lames larges et brillantes. Cette substance est blanche, fond à 79° et bout à 212°.

PARAFFINE.

Dans les goudrons provenant de la distillation des matières animales et de houille, on rencontre encore deux hydrogènes carbonés, qui ont reçu le nom de *paraffine* et *denpierre*.

IDRIALINE.

C'est un hydrogène carboné qu'on obtient par la distillation de certains cinabres naturels.

NAPHTE.

Il a pour formule $C^{6}. H^{5}$. C'est un carbure d'hydrogène qui se rencontre dans plusieurs localités, et principalement en Toscane. On l'obtient aussi en distillant de la houille. Ce corps est liquide, peu soluble dans l'eau. C'est un des meilleurs dissolvants du *caoutchouc*.

CAOUTCHOUC.

Il est connu dans le commerce sous le nom de *gomme élastique*, bien qu'il n'ait aucune analogie avec les gommes. On l'obtient en faisant des incisions dans un arbre originaire d'Amérique, l'*hoerca caoutchouc*. On recouvre avec un pinceau des moules en argile et on fait sécher cette première couche, après quoi on en applique une seconde, puis une troisième, jusqu'à ce qu'on obtienne l'épaisseur désirée. Le *caoutchouc* qui nous arrive ainsi est d'une couleur brune plus ou moins foncée. Cela tient à ce que la dessiccation des moules s'opère dans les cabanes enfumées des indigènes.

Le caoutchouc pur est sans couleur, insoluble dans l'eau

et dans l'alcool, mais soluble dans l'éther sulfurique. Il a pour formule $C^8. H^7$.

Le caoutchouc est employé dans les laboratoires pour la fabrication des tubes propres à remplacer les bouchons. Il sert aussi à enduire des étoffes dites imperméables.

TEINTURES.

Les tissus sur lesquels on applique les couleurs sont de deux espèces : les uns, formés de laine ou de soie, appartiennent au règne animal; les autres, composés de chanvre, de lin et de coton, proviennent du règne végétal. Les fibres qui forment les tissus sont imprégnés de substances étrangères qui les rendent peu attaquables par les matières colorantes. Pour les substances végétales, c'est un corps riche en hydrogène, de consistance résineuse. Pour la laine, on y a découvert deux principes appelés *stéarérine* et *élaïédine*. C'est ce qu'on nomme aussi le *suint*.

Avant d'appliquer les couleurs, il faut donc débarrasser les tissus de ces corps. Cette préparation, qui se compose de deux opérations, porte le nom de *désuintage* et *blanchiment* pour la laine, et *décreusage* et *blanchiment* pour les autres.

Opération du désuintage et du blanchiment.

On soumet la laine à l'action des matières ammoniacales, telles que l'urine putréfiée; on lave ensuite à grande eau. Pour le blanchiment, on lave les tissus dans une dissolution tiède de savon, puis dans de l'eau pure. Quand ils sont séchés, on les expose à l'action du gaz sulfureux.

Pour la soie, qui renferme environ 25 p. 100 de matière grasse, on opère le décreusage en la faisant bouillir avec de l'eau de savon. Le blanchiment s'effectue par des lavages à l'eau de savon et l'exposition à l'action du gaz sulfureux. Pour le coton, le chanvre et le lin, on opère le décreusage en les maintenant dans une dissolution bouillante de potasse ou de soude caustique.

Mordançage.

Pour fixer d'une manière durable la matière colorante sur un tissu, on se sert d'un intermédiaire qui a une grande affinité et pour le tissu et pour la couleur qu'il s'agit de fixer. Cette substance se nomme *mordant*, et l'opération elle-même, *mordançage*.

Les mordants les plus fréquemment employés sont : l'alun

l'acétate d'alumine, l'acétate et le sulfate de fer, le chlorure d'étain.

Les tissus à teindre sont plongés dans une dissolution d'un de ces sels, à une température déterminée. Pour la soie, cette température est de 12 à 15°, de 30 à 50 pour le coton, le chanvre et le lin, et de 100° pour la laine.

INDIGOTINE.

L'indigo se retire de certaines plantes de la famille des légumineuses, du pastel, du *polygonium tinctorium*. On laisse macérer les feuilles de ces plantes dans de grands cuviers qui laissent déposer l'indigo. Le précipité est lavé et livré au commerce sous forme de pains.

On se procure de l'indigotine en distillant l'indigo à la température de 250 à 300°. L'indigotine cristallise sous forme d'aiguilles d'un bleu foncé. L'indigotine a pour formule $C^{16}.H^5.AzO^2$. Cette substance est insoluble dans l'eau et l'alcool.

L'acide sulfurique concentré dissout l'indigotine à l'aide de la chaleur, et donne une dissolution bleue qui sert à teindre les étoffes. Ce produit porte le nom, dans le commerce, de bleu de Saxe.

L'acide nitrique transforme l'indigotine en acide indigotique et en acide carbazotique, qui est une substance très-amère.

ORSEILLE.

C'est une matière d'une couleur très-riche.

On distingue deux espèces d'orseille :

1° Orseille de mer,

2° Orseille de terre.

La première est plus riche.

Préparation. — L'orseille de mer s'obtient au moyen d'une espèce de lichen qui croît aux Canaries. On récolte ces lichens verts. On les met en contact avec de l'eau et de l'ammoniac, et on remue de temps en temps la masse pour lui donner le contact de l'air. Il faut saisir le moment où la couleur est au maximum.

On emploie un autre procédé qui consiste à humecter les lichens avec de l'urine putréfiée, à laquelle on ajoute un peu de chaux pour faire dégager l'ammoniac. L'orseille de terre s'obtient par les mêmes moyens. Mais les lichens sont diffé-

rents; c'est en Auvergne qu'on en rencontre le plus. Ils croissent par plaques, aussi emportent-ils beaucoup de terre nuisible à la couleur.

Dans cette opération, rien n'est plus important que la graduation de l'ammoniac. Lorsqu'on prend le lichen vert, et qu'on le traite par l'alcool, en faisant évaporer, on a un extrait; si, ensuite, on reprend par l'eau, en faisant évaporer spontanément, on obtient des cristaux d'un beau rouge; si l'on reprend ces cristaux, qu'on les traite encore par l'eau en faisant évaporer, on obtiendra des cristaux très-volumineux, appelés *orcine*.

L'orcine a une saveur très-sucrée; entièrement soluble dans l'eau et dans l'alcool, très-volatile à 290°.

Si l'on prend ces cristaux, et que l'on fasse passer petit à petit de l'ammoniac dans une éprouvette, les cristaux se transformeront en une couleur violette excessivement foncée, appelée *orcéine*. C'est la matière colorante de l'orseille.

L'orseille se fixe sur les étoffes sans mordant; si on en emploie, on prend des sels d'étain. Sa couleur tient le milieu entre la cochenille et le bois de Campêche.

Les acides font passer au rose l'orseille; cette couleur passe au soleil.

EMATHINE.

Cette matière colorante se trouve dans le bois de Campêche.

Ce bois croît dans l'Amérique; il est jaune, très-dur. On débite le bois de Campêche en filets; cet usage est vicieux.

Dans cet état, on ne peut extraire l'émathine; car, au contact de l'air, le bois est chargé d'une matière colorante brune, qui empêche la cristallisation.

Pour avoir cette matière, il faut bien nettoyer la bûche de toute la couleur brune et infuser dans de l'eau chaude. On évapore au bain de sable jusqu'à siccité; on fait ensuite dissoudre dans l'alcool qui prend la matière colorante; on évapore. Il reste encore une matière résineuse dont on se débarrasse en traitant par l'eau. En faisant de nouveau évaporer, on obtient la matière *émathine*. Elle colore l'eau faiblement; mais en ajoutant de l'ammoniac, la couleur se fonce.

Dans les bûches du bois de Campêche, on trouve quelquefois des cavités remplies d'*émathine pure*.

L'émathine, traitée par les acides, passe au jaune; si on ajoute un excès, elle passe au rouge; l'acide sulfureux la détruit. La soude, l'ammoniac, la potasse font passer l'émathine

au rouge pourpre, lequel passe au brun, au contact de l'air.

L'émathine, fixée à l'aide de l'alumine sur de la laine, donne une couleur violette.

Avec le bichlorure d'étain, un beau rouge.

Avec le chlorure, un beau violet.

Avec les sels de cuivre, un bleu assez éclatant.

Avec les sels de fer on obtient un noir-bleu.

Le bois de Campêche peut s'employer de deux manières :

1° Le bois est renfermé dans un sac qui plonge dans le bain.

2° On extrait la matière colorante, par l'eau que l'on verse petit à petit dans le bain. La dissolution ne doit pas être préparée d'avance.

Pour que le bois de Campêche donne le reflet de l'orseille, il faut prendre les plus grands soins afin qu'il n'y ait pas formation de cette couleur brune.

On peut se prononcer sur une étoffe teinte avec l'indigo ou avec le bois de Campêche. Les acides, avec le premier, ne donnent rien; avec le second on a une couleur rouge due au bois de Campêche.

Le bois de Campêche entre dans la composition de l'encre. Il sert aussi à la composition des lacques.

Il possède une saveur sucrée.

BOIS DE BRÉSIL.

Ce bois offre une matière colorante rouge. Sa saveur est sucrée; avec de l'eau, l'infusion est d'un très-beau rouge.

La matière colorante de ce bois est à peu près la même que celle de l'émathine. Avec les alcalis, couleur violette.

Avec les acides, jaune-serin.

Le vinaigre la fait passer au violet; l'acide sulfurique au rose.

Le bois de Brésil, par exposition à l'air, donne une plus belle couleur. On fait bouillir une dissolution, qu'on expose à l'air pendant plusieurs mois, même une année, si cela est possible.

On l'emploie pour faire des couleurs composées, le faux écarlate, etc. Cette couleur manque de reflet.

TOURNESOL.

Si l'on prend de l'orseille, et que l'on augmente la dose d'ammoniac à l'air, la couleur passe au violet; si l'on ajoute de la craie de manière à former une pâte, et qu'ensuite on la moule en petits pains, on obtient le tournesol. Ce sont les Hollandais qui tiennent cette fabrication secrète.

Il existe une autre espèce de tournesol, appelée *tournesol en drapeau*.

Le tournesol en drapeau se prépare dans le midi de la France avec une plante appelée *maurel*. On écrase ces végétaux à l'aide d'un moulin, et avec les liqueurs on obtient la matière bleue qu'on livre aux Hollandais. On imbibe des chiffons de cette matière; quand ils sont secs, on les traite par l'urine putréfiée; une couleur bleue, mais très-peu intense, se manifeste. Pour la former, on se procure du fumier frais qu'on étend par couche; on enveloppe les chiffons avec une toile à torchons; l'on recouvre de fumier. La couleur bleue se manifeste alors dans tout son éclat. Il faut saisir le moment où la couleur est la plus intense. On fait sécher de nouveau. On livre ce produit aux Hollandais, qui s'en servent, mais pour fabriquer le tournesol en pains.

CYANOGÈNE.

Le cyanogène, ou azoture de carbone, se prépare en chauffant à une douce chaleur le cyanhydrate de mercure desséché.

Le cyanogène se dégage sous forme de fluide élastique inflammable, à la température de 200°. Sa densité est égale à 1,816.

La formule du cyanogène est C^2Az.

ACIDE CYANHYDRIQUE.

Il se prépare au moyen du cyanure de mercure que l'on met en contact avec de l'acide chlorhydrique. Il a pour formule $C^2.AzH$. Il est liquide, incolore à 7°. Il a pour densité 0,705. A 15° cet acide se solidifie et cristallise.

L'acide cyanhydrique est le poison le plus violent que l'on connaisse. Son contrepoison est l'eau de chlore, qui le transforme en acide chlorhydrique et en chlorure de cyanogène solide.

Cet acide existe dans l'eau distillée de laurier-cerise. Il se trouve aussi dans l'huile d'amandes amères et le kirsch.

CHIMIE ANIMALE.

Les corps qu'on tire du règne animal sont difficiles à étudier, car on ne peut ni les fondre, ni les faire cristalliser; aussi l'étude de cette partie de la chimie est-elle peu avancée.

ALBUMINE.

Cette substance existe dans le sang et dans le blanc d'œuf. Elle est composée de :

Carbone.	53,5	parties.
Hydrogène	7,2	
Azote.	15,8	
Oxigène.	23,5	

Traces de soufre et de cendres.

FIBRINE.

Elle existe dans le sang et constitue la base de la chair musculaire de tous les animaux.

URÉE.

Cette matière existe dans l'urine. C'est un véritable alcali animal. Il a pour formule : $C^2.Az^2.H^4.O^2$.

ACIDE URIQUE.

Cet acide se rencontre aussi dans l'urine des mammifères. Il a pour formule : $C^{10}.Az^4.H^4.O^6$.

ACIDE HYPPURIQUE.

Il se rencontre dans l'urine des mammifères herbivores, et dans celle des enfants, dans les premiers temps de leur naissance.

CASÉUM.

Cette substance existe dans le lait, le sang et les céréales. Quand il est pur, il est insoluble dans l'eau. Il est composé de :

Carbone.	54,2	parties.
Hydrogène	7,1	
Oxigène.	22,7	
Azote.	16,0	

GÉLATINE.

La gélatine renferme :

Carbone.	48	parties.
Hydrogène	8	
Oxigène.	17	
Azote.	27	

Un des caractères de la gélatine pure, c'est d'être insoluble dans l'eau froide.

Elle existe en grande quantité dans la chair musculaire, la peau, les cartilages, les tendons, et les os de tous les animaux.

La gélatine se prépare en traitant les os par l'acide hydrochlorique. On mêle un poids égal d'os et d'acide. Le carbonate de chaux est transformé en chlorure de calcium et le phosphate neutre en phosphate acide de chaux. Les os deviennent alors mous, et l'ébullition les transforme en gélatine.

On emploie la gélatine dans les arts pour faire de la colle. Cette gélatine est préparée avec des rognures de peaux de veau, de mouton, de bœuf et de cheval, de parchemin, etc.

Ces gélatines, diversement préparées, se vendent dans le commerce sous le nom de :

Colle de Paris. — C'est la plus mauvaise.

Colle de Givet. — Elle est transparente, et elle est préférée à cause de cela.

Colle anglaise ou *façon anglaise.* — Elle est meilleure que celle de Givet, mais elle n'est pas transparente.

Colle blonde, trouble. — C'est la meilleure.

Colle de Flandre. — Elle contient de l'alun qui lui donne de la consistance.

FIN DU TOME PREMIER.

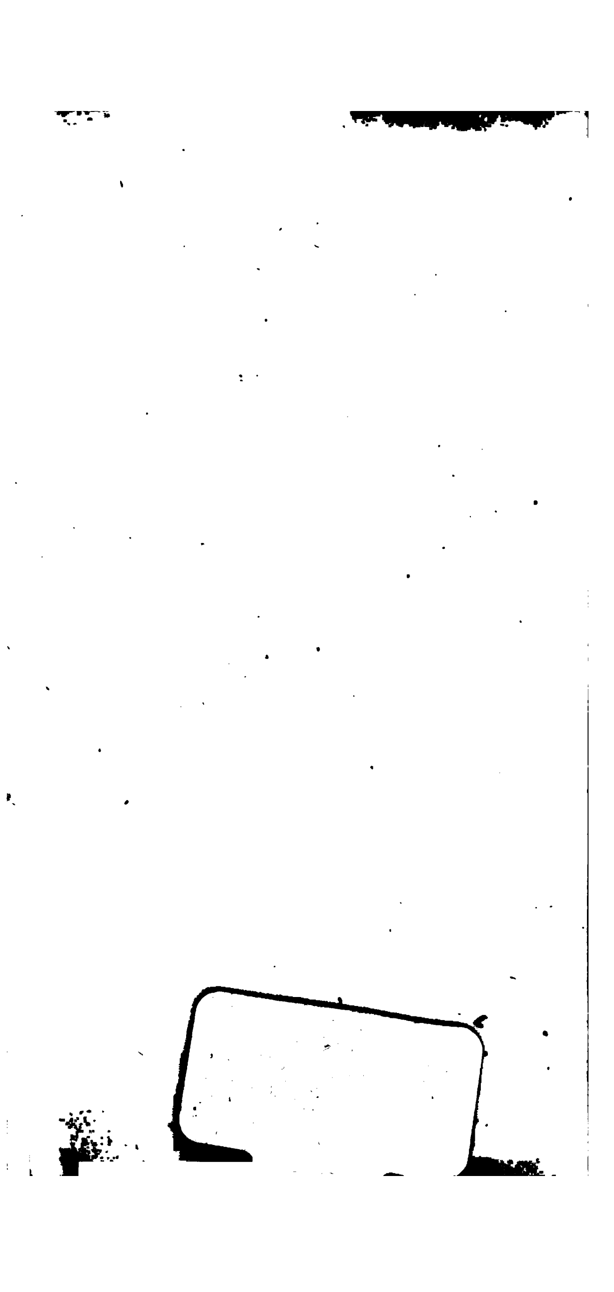
TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES

DANS LE PREMIER VOLUME.

FIN DE LA TABLE DU PREMIER VOLUME.

BAR-SUR-SEINE. — IMP. DE SAILLARD.



Il existe une autre espèce de tournesol, appelée *tournesol en drapeau*.

Le tournesol en drapeau se prépare dans le midi de la France avec une plante appelée *maurel*. On écrase ces végétaux à l'aide d'un moulin, et avec les liqueurs on obtient la matière bleue qu'on livre aux Hollandais. On imbibe des chiffons de cette matière; quand ils sont secs, on les traite par l'urine putréfiée; une couleur bleue, mais très-peu intense, se manifeste. Pour la former, on se procure du fumier frais qu'on étend par couche; on enveloppe les chiffons avec une toile à torchons; l'on recouvre de fumier. La couleur bleue se manifeste alors dans tout son éclat. Il faut saisir le moment où la couleur est la plus intense. On fait sécher de nouveau. On livre ce produit aux Hollandais, qui s'en servent, mais pour fabriquer le tournesol en pains.

CYANOGÈNE.

Le cyanogène, ou azoture de carbone, se prépare en chauffant à une douce chaleur le cyanhydrate de mercure desséché.

Le cyanogène se dégage sous forme de fluide élastique inflammable, à la température de 200°. Sa densité est égale à 1,816.

La formule du cyanogène est C^2Az.

ACIDE CYANHYDRIQUE.

Il se prépare au moyen du cyanure de mercure que l'on met en contact avec de l'acide chlorhydrique. Il a pour formule $C^2.AzH$. Il est liquide, incolore à 7°. Il a pour densité 0,705. A 15° cet acide se solidifie et cristallise.

L'acide cyanhydrique est le poison le plus violent que l'on connaisse. Son contrepoison est l'eau de chlore, qui le transforme en acide chlorhydrique et en chlorure de cyanogène solide.

Cet acide existe dans l'eau distillée de laurier-cerise. Il se trouve aussi dans l'huile d'amandes amères et le kirsch.

CHIMIE ANIMALE.

Les corps qu'on tire du règne animal sont difficiles à étudier, car on ne peut ni les fondre, ni les faire cristalliser; aussi l'étude de cette partie de la chimie est-elle peu avancée.

ALBUMINE.

Cette substance existe dans le sang et dans le blanc d'œuf. Elle est composée de :